



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

В.А. Арефьев, А.А. Лутовинов,
С.В. Мольков, А.В. Погодин,
А.Г. Тучин, Д.А. Тучин

Решение навигационной
задачи с использованием
измерений сигналов
рентгеновского пульсара по
данным космического
аппарата «Интеграл»

Статья доступна по лицензии
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Решение навигационной задачи с использованием измерений сигналов рентгеновского пульсара по данным космического аппарата «Интеграл» / В.А. Арефьев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2025. № 6. 20 с.
EDN: [IDPSJR](https://doi.org/10.26907/2071-2898.2025.6.20)
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2025-6>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Российской академии наук

В.А. Арефьев, А.А. Лутовинов, С.В. Мольков,
А.В. Погодин, А.Г. Тучин, Д.А. Тучин

Решение навигационной задачи
с использованием измерений сигналов
рентгеновского пульсара по данным
космического аппарата «Интеграл»

Москва – 2025

Арефьев В.А., Лутовинов А.А., Мольков С.В., Погодин А.В., Тучин А.Г., Тучин Д.А.

Решение навигационной задачи с использованием измерений сигналов рентгеновского пульсара по данным космического аппарата «Интеграл»

Рассмотрены методы и алгоритмы определения параметров движения космического аппарата по сигналам рентгеновских пульсаров. Обработаны бортовые навигационные измерения рентгеновского пульсара PSR B0531+21, полученные космической обсерваторией «Интеграл». Решена задача определения орбиты космического аппарата, а также найден доплеровский сдвиг частоты сигнала пульсара. Выполнено сравнение полученной орбиты с параметрами орбиты космической обсерватории «Интеграл».

Ключевые слова: рентгеновские пульсары, определение орбиты, навигационная задача, космическая обсерватория «Интеграл»

Arefiev A.E., Lutovinov V.A., Molkov S.V., Pogodin A.V., Tuchin A.G, Tuchin D.A.

Solving the navigation problem by using measurements of X-ray pulsar signals based on data from the «Integral» spacecraft

Determining spacecraft motion parameters methods and algorithms based on X-ray pulsar signals are considered. On-board navigation measurements of the X-ray pulsar PSR B0531+21 obtained by the «Integral» spacecraft have been processed. The problem of spacecraft orbit determination has been solved and the Doppler frequency shift of the pulsar signal has been determined. The obtained orbit is compared with the parameters of the orbit of the space observatory «Integral».

Key words: X-ray pulsars, orbit determination, navigation task, «Integral» space observatory

Оглавление

Введение	3
1. Принципы рентгеновской навигации	4
2. Общие сведения о КА «Интеграл»	8
3. Получение профиля сигнала	9
4. Приведение момента времени фиксации импульса в БСС	10
5. Определение доплеровского сдвига частоты сигнала пульсара	12
6. Определение параметров движения КА	13
Заключение	17
Список сокращений	18
Библиографический список	18

Введение

Нейтронные звезды имеют сверхсильные магнитные поля с индукцией до 10^{15} Гс и периоды вращения от 1.4 мс до 8.5 с [1]. Нейтронные звёзды наблюдаются как пульсары, если их оси вращения не совпадают с положениями их магнитных диполей (рис. 1). При их вращении регистрируются короткие импульсы излучения, включая рентгеновский диапазон.

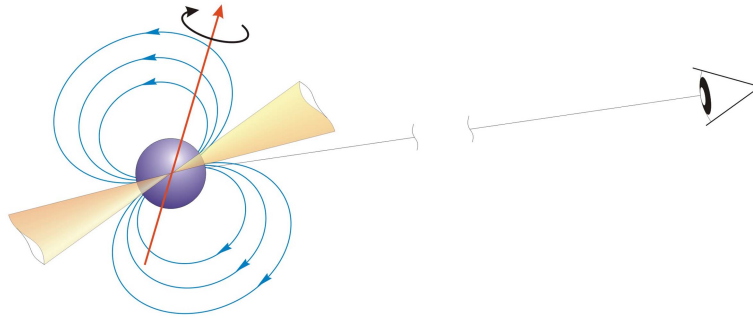


Рис. 1. Схема наблюдения излучения пульсара

Впервые пульсары были зарегистрированы в радиодиапазоне электромагнитного спектра [2], однако позднее обнаружили и такие объекты, максимум излучения которых приходился на оптический, ультрафиолетовый и рентгеновский диапазоны длин волн.

Приёмной аппаратурой регистрируется изменение интенсивности излучения во времени. Период сигнала соответствует периоду вращения пульсара. Сигнал зависит от типа излучения пульсара, частоты его вращения, относительного положения оси вращения и линии его визирования наблюдателем.

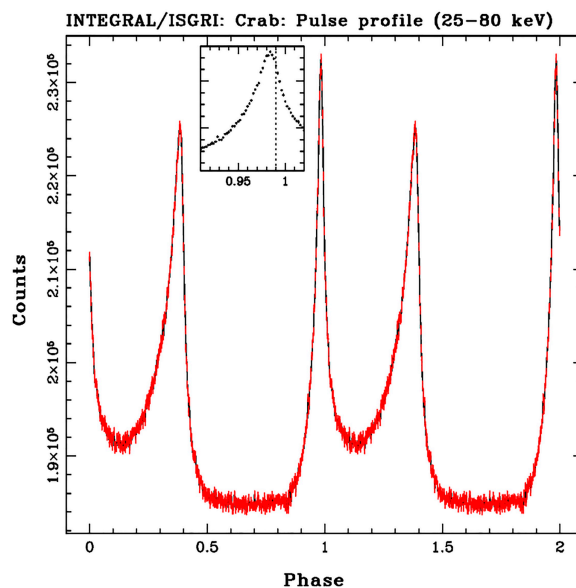


Рис. 2. Профиль импульса пульсара PSR B0531+21

На рис. 2 приведён профиль сигнала пульсара PSR B0531+21 в Крабовидной туманности по данным обсерватории «Интеграл». По оси абсцисс отложена фаза сигнала в периодах вращения, по оси ординат – число соответствующих фазе зарегистрированных фотонов с энергией в диапазоне от 25 до 80 кэВ.

Пусть t_1 – время регистрации сигнала; $t_{\text{эф}}$ – время фиксации параметров сигнала в эфемеридных сутках; $f_{\text{эф}}$ – эфемеридная частота сигнала пульсара на момент $t_{\text{эф}}$; \dot{f} , \ddot{f} , \dddot{f} – первая, вторая и третья производные частоты пульсара. Пусть $\Delta t = (t_1 - t_{\text{эф}}) \cdot 86400$ – интервал в секундах между t_1 и $t_{\text{эф}}$, тогда изменение частоты излучения пульсара во времени можно представить в виде [3]

$$f(t_1) = f_{\text{эф}} + \Delta t \cdot \dot{f} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \cdot \ddot{f} + \frac{1}{6} \Delta t^3 \cdot \dddot{f}.$$

Учитывая, что производные частоты вращения пульсара обычно очень малы, пульсары можно рассматривать как естественные стандарты частоты. По аналогии с сигналами глобальных навигационных спутниковых систем это свойство можно использовать в космической навигации. При этом область пространства, в которой может осуществляться такая навигация, не ограничена только лишь зоной околоземных орбит, как в случае глобальных спутниковых навигационных систем, а простирается на всю Солнечную систему и за её пределы.

Предложения по использованию пульсаров для цели навигации появились вскоре после их открытия [4]. С точки зрения уменьшения размеров аппаратуры для приёма сигналов от пульсаров и с учётом количества навигационных источников в разных диапазонах электромагнитного спектра наиболее эффективным оказывается использование рентгеновского диапазона длин волн [5].

Далее приведены результаты применения навигационных алгоритмов на основе данных, полученных космической рентгеновской обсерваторией «Интеграл».

1. Принципы рентгеновской навигации

Существующие подходы к решению навигационной задачи с использованием сигналов рентгеновских пульсаров описаны в работах [6–11]. Принцип заключается в сравнении фактических и расчётных времён поступления нулевой фазы сигнала, которые принято называть моментами времени фиксации импульса. В зарубежных публикациях эти моменты времени обозначают как TOA – Time of Arrival. Различаются моменты фиксации импульса на космическом аппарате и в барицентре Солнечной системы (БСС), которые далее будут обозначаться через $t^{\text{КА}}$ и $t^{\text{БСС}}$ соответственно. Нижний индекс i будем использовать для указания номера измерения, который однозначно соответствует номеру пульсара. Схемы получения измерительной информации и работы системы навигации по сигналам пульсаров показаны на рис. 3 и 4 соответственно.

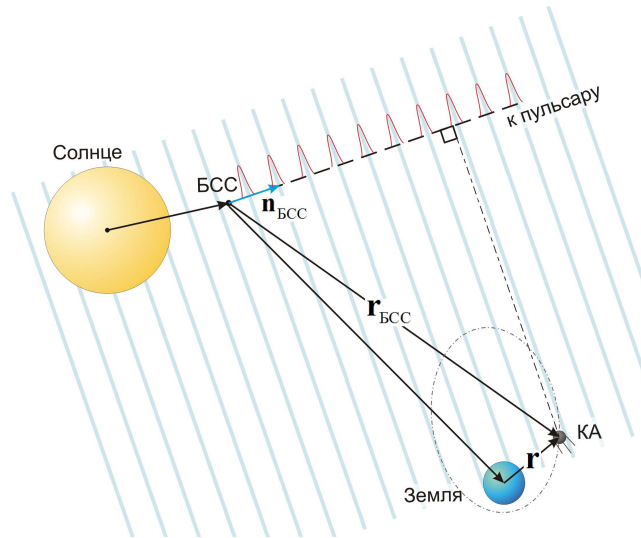


Рис. 3. Геометрическая схема проведения измерений

На рис. 3 приведена геометрическая схема проведения измерений при решении задачи рентгеновской навигации, где $\mathbf{n}_{\text{БСС}}$ – направление из БСС на пульсар, \mathbf{r} – вектор положения космического аппарата (КА) в геоцентрической системе координат (СК), $\mathbf{r}_{\text{БСС}}$ – вектор положения КА в БСС. На рис. 4 приведена принципиальная схема алгоритма вычисления поправок $\Delta \mathbf{x}$ [12].

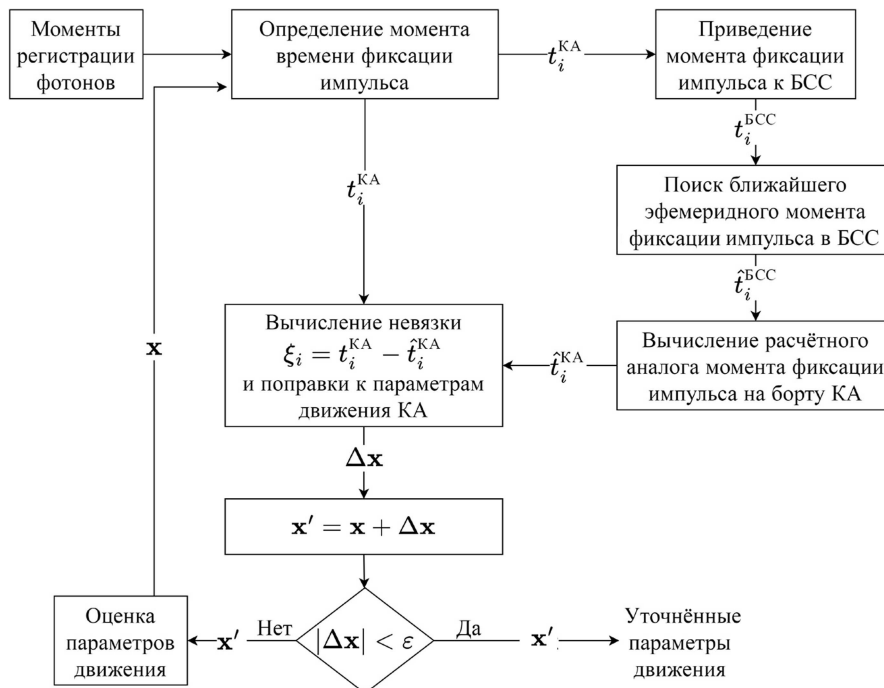


Рис. 4. Схема уточнения параметров движения КА

Навигационный алгоритм заключается в следующем:

- на КА принимаются сигналы пульсара, по ним определяется момент времени фиксации импульса $t_i^{\text{КА}}$,

- с учётом предварительной оценки положения КА в пространстве производится оценка этого момента времени фиксации импульса для БСС t_i^{BCC} ,
- для полученного момента фиксации импульса в БСС t_i^{BCC} по эфемеридам наблюдаемого пульсара осуществляется поиск ближайшего эфемеридного момента фиксации импульса \hat{t}_i^{BCC} , который затем пересчитывается для предполагаемых координат КА $\hat{t}_i^{\text{КА}}$.

Таким образом, появляются пары значений $t_i^{\text{КА}}$ и $\hat{t}_i^{\text{КА}}$, разность которых $\xi_i = t_i^{\text{КА}} - \hat{t}_i^{\text{КА}}$ подаётся на вход навигационного алгоритма.

Решение навигационной задачи сводится к нахождению такого вектора состояния КА \mathbf{x}^* , который определяется из условия минимизации функционала:

$$\Phi(\mathbf{x}^*) = \sum_{i=1}^N \frac{\xi_i^2}{\sigma_{\text{ТОА}}^2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{ТОА}}$ – среднеквадратичное отклонение ошибок измерений моментов времени фиксации импульса.

Дополнительную навигационную информацию можно извлечь из частоты принимаемых на КА сигналов пульсаров. Если рассматриваются апогейные участки околоземных орбит с большим эксцентриситетом, полёт в окрестности точек либрации системы Солнце–Земля или межпланетные траектории, то короткие участки полёта КА до 1.5 ч могут быть аппроксимированы отрезками прямой с постоянной скоростью [13].

На рассматриваемых коротких участках полёта можно утверждать, что ориентация вектора скорости относительно направления БСС–пульсар не меняется и, таким образом, частота принимаемого сигнала пульсара будет отличаться от номинальной эфемеридной частоты на некоторую постоянную для рассматриваемого интервала величину. В зарубежной литературе релятивистский доплеровский сдвиг частоты обозначается как RDE – Relativistic Doppler Effect. Значение ожидаемого релятивистского доплеровского сдвига $\Delta \hat{f}$ вычисляется по следующим формулам [14]:

$$f_{\text{ожид}} = (z' + 1)(z'' + 1)f_{\text{КА}},$$

$$z' + 1 = 1 - \frac{1}{c^2}U(\mathbf{r}) + O(c^{-4}) \approx 1 - \frac{1}{c^2} \sum_B \frac{GM_B}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_B|},$$

$$z'' + 1 = \left(1 - \frac{|\mathbf{v}_{\text{BCC}}|^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{|\mathbf{v}'|}{c}\right)^{-1},$$

$$\Delta \hat{f} = f_{\text{ожид}} - f_{\text{КА}} = f_{\text{ожид}} \cdot \left(1 - \frac{1}{(z' + 1)(z'' + 1)} \right),$$

где $f_{\text{КА}}$ – частота сигнала, зарегистрированная на борту КА; $f_{\text{ожид}}$ – ожидаемая частота сигнала с учётом релятивистского доплеровского сдвига; $\mathbf{v}_{\text{БСС}}$ – скорость КА относительно БСС; \mathbf{v}' – вектор проекции барицентрической скорости КА на направление БСС–пульсар; $U(\mathbf{r})$ – величина гравитационного потенциала в точке с координатами КА; G – универсальная гравитационная постоянная; M_B – масса небесного тела B ; \mathbf{r} – вектор положения КА в геоцентрической СК; \mathbf{r}_B – вектор положения небесного тела в геоцентрической СК; c – скорость света; $O(c^{-4})$ – остаточный член.

На рис. 5 приведено взаимное расположение вектора скорости $\mathbf{v}_{\text{БСС}}$ КА относительно БСС и его проекции \mathbf{v}' на направление распространения сигнала пульсара.

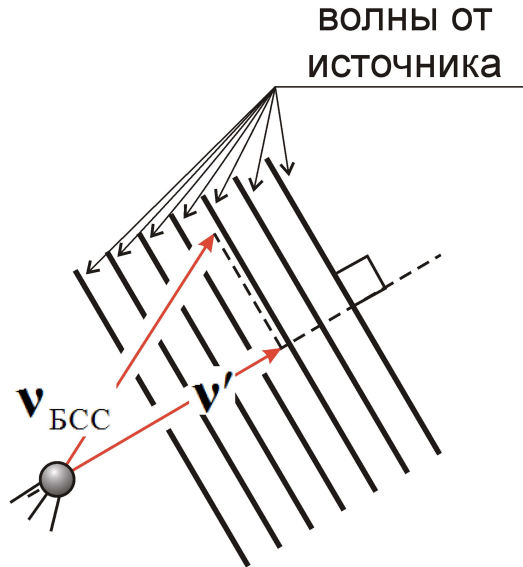


Рис. 5. Скорость КА и направление распространения сигнала

Сравнивая ожидаемое значение релятивистского доплеровского сдвига частоты $\Delta \hat{f}_i$ с полученными по результатам измерений Δf_i , можно сформировать входную информацию навигационного алгоритма – разность этих значений $\psi_i = \Delta f_i - \Delta \hat{f}_i$.

Функционал (1) можно видоизменить следующим образом:

$$\Phi'(\mathbf{X}^*) = w_{\text{ТОА}} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{\xi_i^2}{\sigma_{\text{ТОА}}^2} + w_{\text{RDE}} \cdot \sum_{j=1}^M \frac{\psi_j^2}{\sigma_{\text{RDE}}^2} \rightarrow \min,$$

где w_{TOA} и w_{RDE} – весовые коэффициенты для измерений моментов фиксации импульсов и релятивистского доплеровского сдвига соответственно; σ_{RDE} – среднеквадратичное отклонение ошибок измерений релятивистского доплеровского сдвига.

Таким образом, для реализации алгоритма навигации по сигналам рентгеновских пульсаров необходимо предварительно решить следующие задачи:

- для выделения t_i^{KA} необходимо получить профиль сигнала по массиву измерений времён регистрации отдельных фотонов;
- для вычисления ξ_i необходимо привести момент времени фиксации импульса к БСС;
- для вычисления ψ_i необходимо вычислить релятивистский доплеровский сдвиг, используя априорные параметры движения КА.

Алгоритм получения профиля сигнала приведён в [8]. Методы приведения момента фиксации импульса к БСС с помощью уравнения барицентрической коррекции приведены в [9] и [15], а алгоритм определения частоты зарегистрированного на борту КА сигнала – в [8] и [16].

2. Общие сведения о КА «Интеграл»

Международная астрофизическая лаборатория гамма-лучей «Интеграл» («INTERNATIONAL Gamma-Ray Astrophysics Laboratory») выведена на орбиту в октябре 2002 г. с космодрома Байконур. Научная аппаратура обсерватории работает в рентгеновском и гамма-диапазонах электромагнитного излучения от 15 кэВ до 10 МэВ. Проект реализован Европейским космическим агентством с участием России и Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США. Российские учёные получают 25 % наблюдательного времени обсерватории [17].

Научные эксперименты КА «Интеграл» проводились на околоземной орбите с расстояниями апогея 153 тыс. км и перигея 9 тыс. км, наклоном 73.5 [18]. В таблице 1 приведены параметры орбиты КА «Интеграл», которые привязаны к московскому времени (МВ).

Апостериорные данные с параметрами орбиты КА «Интеграл» обрабатывались совместно с результатами научных наблюдений пульсара PSR B0531+21. Данные об орбите приведены в системе координат FK5 и привязаны к «шкале Земного времени», в зарубежной литературе эту шкалу обозначают как TT – Terrestrial Time.

Результаты научных наблюдений содержат моменты времени t^{KA} регистрации фотона на борту КА в шкале TT, которые соответствуют моментам времени t^{BCC} , приведённым к БСС в шкале барицентрического динамического времени TDB – Barycentric Dynamical Time. Наряду с моментом времени регистрации

фотонов при обработке определяется безразмерная фаза импульса в диапазоне $[0, 1)$.

Таблица 1. Параметры орбиты КА «Интеграл»

Параметр	Значение
МВ	2022-04-05 10:48:48
Полуось	81137.7 км
Эксцентриситет	0.894581
Период	3833.486 мин, или 2.7 сут
Наклонение	73.5°
Долгота восходящего узла	63.2°
Аргумент перигея	299.4°
Расстояние перигея	8553.5 км
Расстояние апогея	153721.9 км

В соответствии с [19], точность знания положения КА «Интеграл» вдоль линии визирования станция–КА составляет ± 10 м, а точность привязки времени наблюдений составляет величину $\delta \pm 40$ мкс, где δ – постоянная поправка, зависящая от аппаратуры.

Далее приведены результаты решения задач, перечисленных в п. 1 при построении навигации по сигналам рентгеновских пульсаров с использованием данных КА «Интеграл».

3. Получение профиля сигнала

Применяя методику, описанную в [8], удалось построить профиль сигнала пульсара PSR B0531+21 по данным измерений на интервале 50 минут. На рис. 6 приведён профиль пульсара PSR B0531+21, полученный по данным измерений КА «Интеграл» на одном временном интервале. По оси абсцисс отложена фаза сигнала в периодах, а по оси ординат – нормализованное число [8] зарегистрированных фотонов.

Шумовые составляющие могут быть существенно ослаблены, если использовать более длительный интервал накопления измерений или суммировать несколько профилей, полученных по смежным интервалам. На рис. 7 показан суммарный профиль пульсара PSR B0531+21, полученный суммированием профилей по нескольким интервалам измерений КА «Интеграл». По оси абсцисс отложена фаза сигнала в периодах, а по оси ординат – нормализованное число зарегистрированных фотонов.

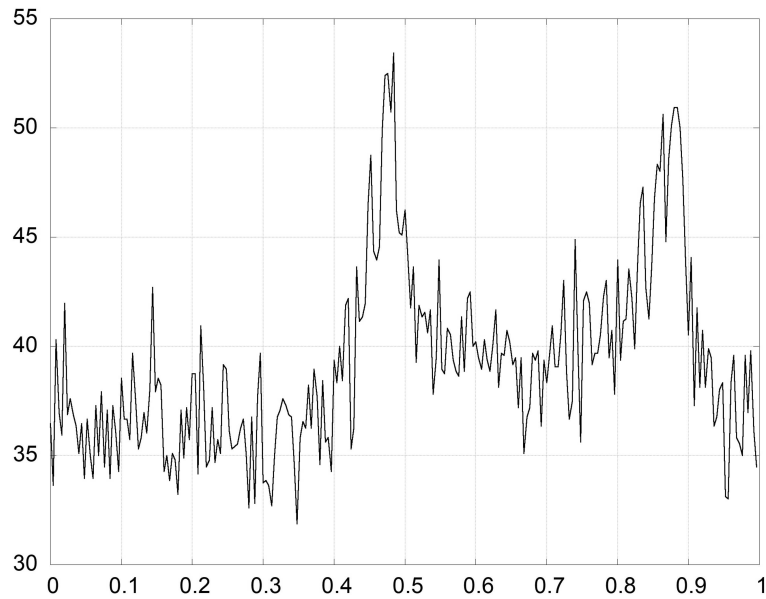


Рис. 6. Профиль пульсара PSR B0531+21

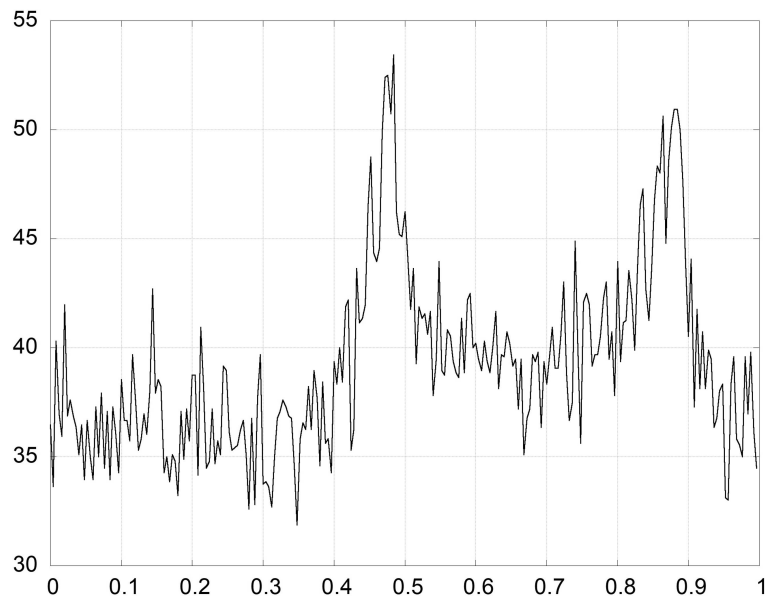


Рис. 7. Суммарный профиль пульсара PSR B0531+21

4. Приведение момента времени фиксации импульса в БСС

Для проверки работы алгоритма использовались данные о моментах времени регистрации фотонов на борту КА, уже имеющие в своём составе соответствующие эталонные моменты времени, приведённые к БСС. Разность между расчётными и эталонными значениями для данных, полученных на трёх разных интервалах, представленных в таблице 2, приведена на рис. 8–10. По оси абсцисс отложен номер измерения, а по оси ординат – рассогласование между

расчётным и априорным значениями моментов регистрации фотона, приведёнными к БСС, в мкс.

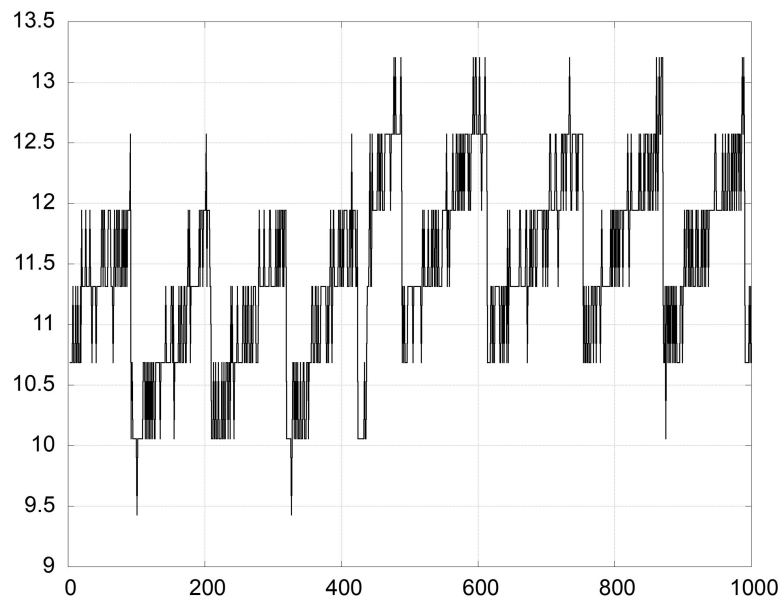


Рис. 8. Невязка между приведёнными к БСС расчётным и эталонным моментами регистрации фотонов на интервале № 1

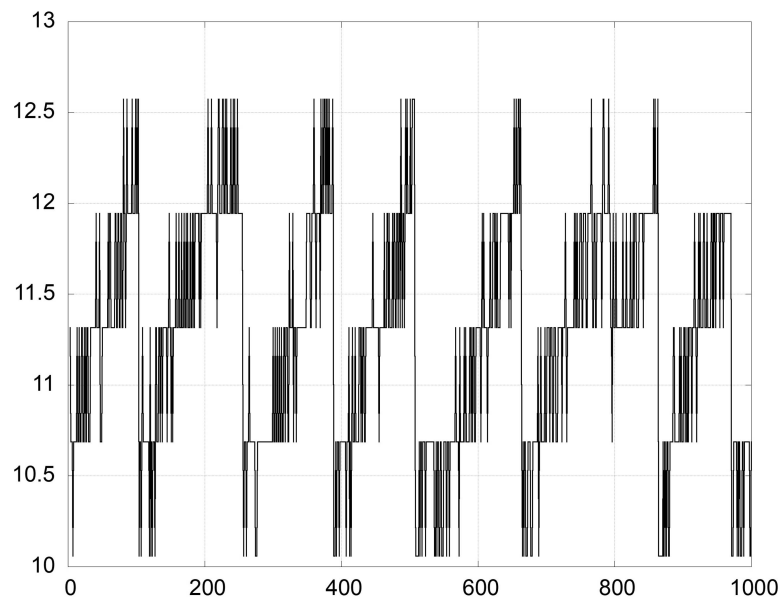


Рис. 9. Невязка между приведёнными к БСС расчётным и эталонным моментами регистрации фотонов на интервале № 2

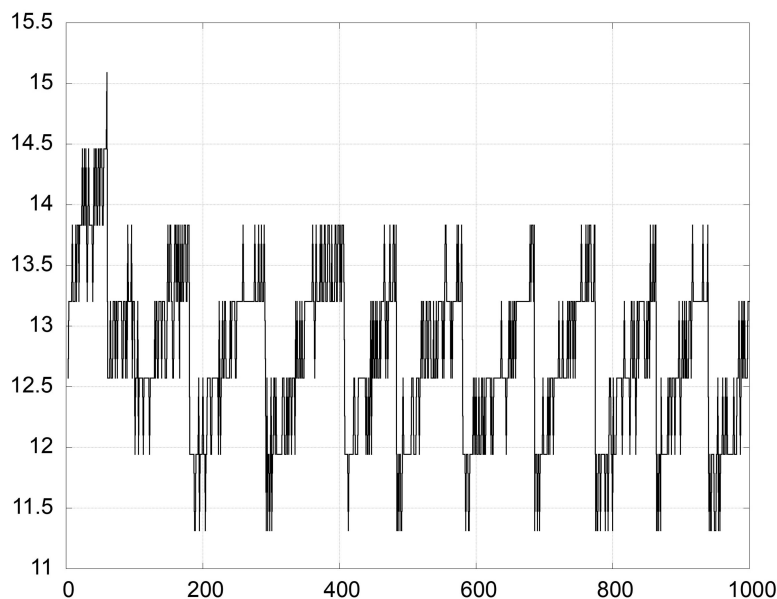


Рис. 10. Невязка между приведёнными к БСС расчётным и эталонным моментами регистрации фотонов на интервале № 3

Таблица 2. Интервалы данных для приведения к БСС

Номер	Начало интервала	Конец интервала
1	2022-01-04 06:47:05	2022-01-04 06:47:33
2	2022-01-04 11:43:43	2022-01-04 11:44:10
3	2022-05-04 02:45:46	2022-05-04 02:46:20

Отметим, что разница составляет от 11 мкс до 15 мкс. Возможной причиной такой величины рассогласования может являться задержка по времени, характерная для научной аппаратуры КА «Интеграл» [19].

5. Определение доплеровского сдвига частоты сигнала пульсара

Рассматривались 56 интервалов наблюдений по 40 минут каждый. Для каждого интервала по методике, описанной в [8], определялась частота сигнала, регистрируемого на борту КА, и её расчётное теоретическое значение, полученное по методике, описанной в [14] для середины интервала с учётом доплеровского сдвига. На рис. 11 приведён график невязок между расчётными и восстановленными по данным наблюдений значениями частоты сигнала пульсара PSR B0531+21 на орбите КА «Интеграл» в Гц. На рис. 12 приведён график погрешности определения скорости КА в БСС в км/с. По оси абсцисс на рис. 11 и 12 отложена истинная аномалия в градусах.

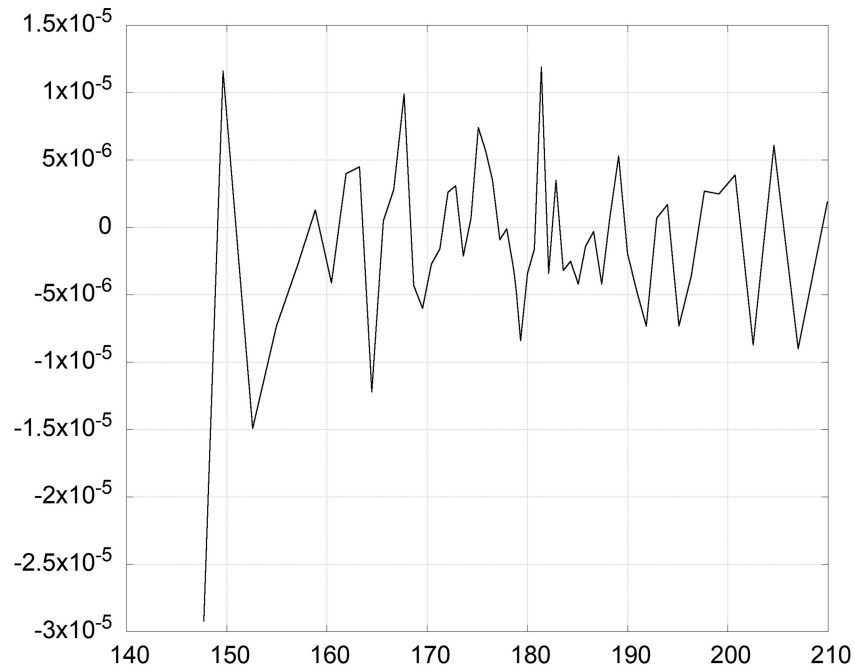


Рис. 11. Разница между расчётным и полученным из наблюдений данных значениями частоты сигналов

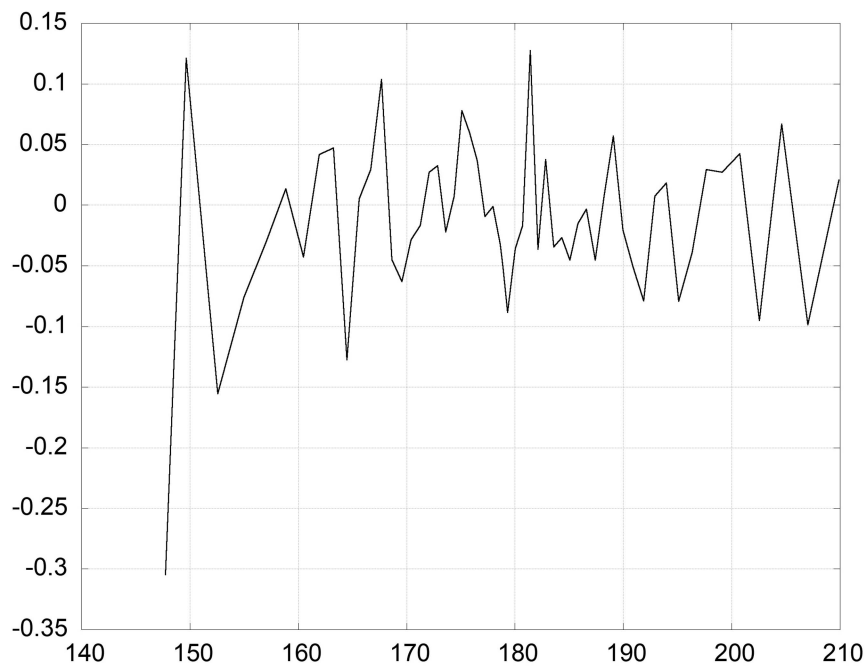


Рис. 12. Погрешности определения скорости КА в БСС

6. Определение параметров движения КА

Определение параметров движения КА «Интеграл» проводилось с использованием алгоритма [20], схематично представленного на рис. 4, и модели движения [21].

В качестве измерений использовались моменты времени фиксации импульсов пульсара Крабовидной туманности PSR B0531+21 на борту КА, полученные при регистрации фотонов в научной аппаратуре. Эфемериды пульсара (координаты на небесной сфере $t_{\phi}, \dot{f}, \ddot{f}, \ddot{\ddot{f}}$) приведены в [22].

В результате обработки исходных измерений получены два массива моментов фиксации импульса. Первый массив получен по исходным измерениям с 2022-03-31 по 2022-04-01, а второй – с 2022-04-04 по 2022-04-05. Для получения моментов фиксации импульсов формировались профили сигнала на интервалах длительностью 30 минут. Алгоритм получения профиля сигнала описан в п. 3. Следует отметить, что при формировании профиля сигнала учитывалось движение КА. Характеристики массивов моментов времени фиксации импульсов показаны в таблице 3. Первые два столбца таблицы содержат начало и конец интервала, привязанные к МВ.

Таблица 3. Размеры массивов измерений

№	Интервал, МВ		Количество измерений
	Начало	Конец	
1	2022-03-31 13:13:54	2022-04-01 17:38:23	30
2	2022-04-04 06:28:09	2022-04-05 10:17:57	27

Кроме массивов измерений моментов времени фиксации импульсов пульсара обработаны массивы кинематических векторов КА «Интеграл». В таблице 4 приведены характеристики массивов этих векторов, соответствующих первому и второму интервалам.

Таблица 4. Размеры массивов кинематических векторов

№	Интервал, МВ		Количество измерений
	Начало	Конец	
1	2022-03-31 08:04:27	2022-04-02 23:01:56	239
2	2022-04-04 08:13:48	2022-04-05 10:48:48	33

Кинематические векторы были использованы как измерения для определения параметров движения на первом и втором участках. В основе метода определения параметров движения лежит сравнение имеющихся кинематических векторов с расчётными значениями, вычисленными интегрированием с использованием уравнений движения КА. Модель движения КА учитывает центральную и нецентральную части гравитационного поля Земли, поля тяготения Солнца, Луны, Меркурия, Венеры, Марса и Юпитера. Уточняемыми параметрами являлись кинематический вектор x, y, z, v_x, v_y, v_z на момент

последнего измерения и безразмерный коэффициент давления солнечной радиации C . Оценка уточняемых параметров определялась из условия минимума функционала, содержащего суммы взвешенных квадратов модулей невязок векторов положения и скорости. Для поиска минимума использовался метод наименьших квадратов. В результате были получены значения искоемых параметров, которые приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты определения параметров движения

Параметры	Интервал № 1	Интервал № 2
t_0 , МВ	2022-04-02 23:01:56.791	2022-04-05 10:48:48.111
x , м	-7659200.9	-34368488.6
y , м	-18672555.3	-48319910.1
z , м	-5102575.6	30200345.6
v_x , м/с	2973.3987	1235.0884
v_y , м/с	4271.9651	1073.5057
v_z , м/с	-2508.4732	-2095.1390
C	$1.158287 \cdot 10^{-5}$	$1.197484 \cdot 10^{-5}$

После решения задачи минимизации остаточные невязки по положению не превосходят 5 м, а по скорости – 3 мм/с.

Было определено, что между первым и вторым интервалами произошло возмущение движения КА, которое было вызвано работой служебных систем, и на момент времени 2022-04-04 06:48:12 МВ оценивается как -5.1 мм/с в радиальном направлении, 2.7 мм/с в направлении движения по орбите и -1.7 мм/с в направлении, ортогональном плоскости орбиты.

Так как определение параметров движения только по измерениям одного пульсара невозможно, то использовалась дополнительная априорная информация [12]. В качестве априорной информации использовался вектор кинематических параметров в момент времени начальных условий (таблица 5) с весами, соответствующими среднеквадратичному отклонению 15 км по компонентам вектора положения и 10 м/с по компонентам вектора скорости.

В результате решения задачи определения параметров движения были получены соответствующие начальные условия. Эти начальные условия были использованы для расчёта невязок между измеренными и расчётными значениями моментов регистрации сигнала. Графики невязок между измеренными и расчётными значениями представлены на рис. 13 для интервала № 1 и на рис. 14 для интервала № 2. По оси абсцисс отложено время в 10^3 с от начала интервала, а по оси ординат – остаточные невязки в мкс.

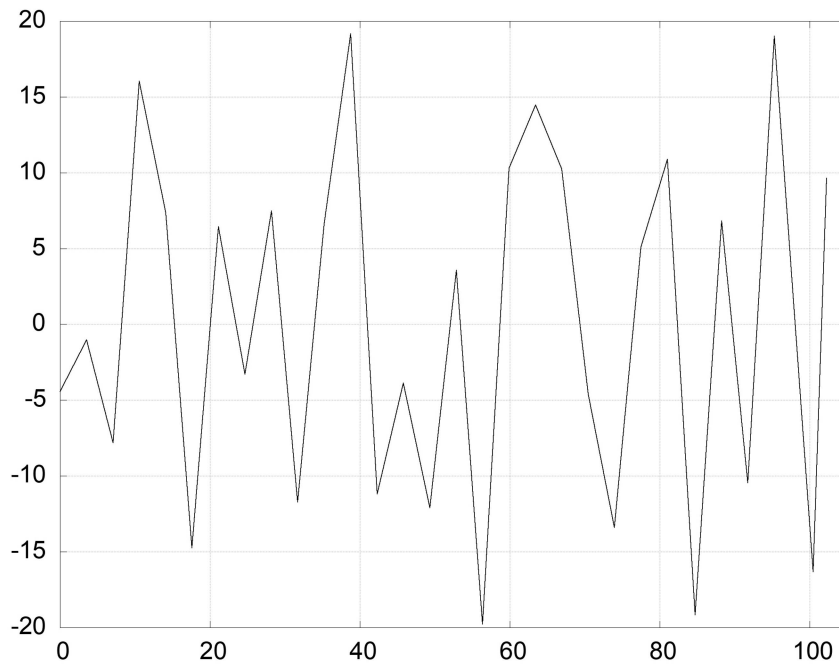


Рис. 13. Остаточные невязки между измеренными и расчётными значениями интервала № 1

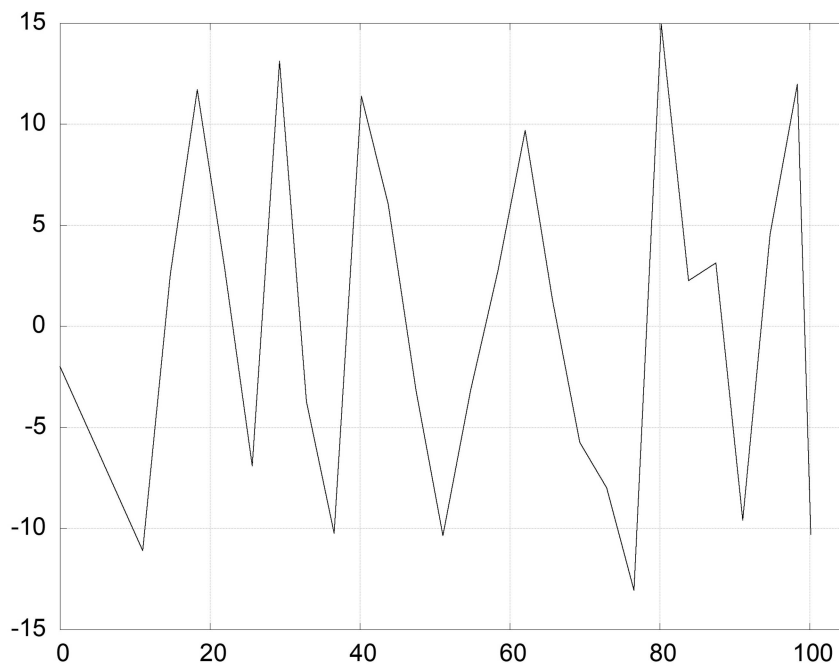


Рис. 14. Остаточные невязки между измеренными и расчётными значениями интервала № 2

Статистические характеристики остаточных невязок представлены в таблице 6.

Таблица 6. Статистические характеристики остаточных невязок

Параметр	Интервал № 1	Интервал № 2
Максимальное значение, мкс	19.17	14.94
Минимальное значение, мкс	-19.78	-13.06
Среднее значение, мкс	-0.025	0.036
Среднеквадратичное отклонение, мкс	11.497	8.349
Количество невязок	30	27

Все невязки принадлежат диапазону от -20 мкс до 20 мкс. Это соответствует разнице между результатами определения моментов времени регистрации фотонов на борту КА и эталонными значениями, которая показана на рис. 8–10.

В таблице 7 приведены невязки между эталонными кинематическими векторами положения и скорости КА и определёнными по измерениям сигналов от рентгеновских пульсаров. Невязки приведены в системе координат, определяющей направление на пульсар. Приведены значения в направлении на пульсар и в ортогональном направлении.

Таблица 7. Невязки кинематических векторов положения и скорости

Интервал	По положению, м		По скорости, м/с	
	на пульсар	ортогонально	на пульсар	ортогонально
1	3064	1348	-0.100	0.431
2	-5079	201	0.135	0.441

Заключение

Обработаны измерения пульсара PSR B0531+21 космической обсерватории «Интеграл».

Реализованы алгоритмы приведения момента времени фиксации импульса к БСС. Проведено определение параметров орбиты КА по навигационным измерениям рентгеновского пульсара.

Показано, что навигационные измерения рентгеновских пульсаров позволяют эффективно решать навигационную задачу по определению орбиты. Возможно достижение точности определения параметров движения КА, сравнимой с возможностями отечественного наземного измерительного комплекса [20] для космических аппаратов дальнего космоса.

Повышение количества обрабатываемых рентгеновских пульсаров позволит качественно уменьшить величину ошибки определения кинематических векторов положения и скорости. Для этого необходимо создание и поддержание отечественного каталога пульсаров.

Список сокращений

RDE	Relativistic Doppler Effect
TDB	Barycentric Dynamical Time
TOA	Time of Arrival
TT	Terrestrial Time
БСС	барицентр Солнечной системы
КА	космический аппарат
МВ	московское время
СК	система координат

Библиографический список

1. *Condon, J. Essential Radio Astronomy / J. Condon, S. Ransom.* — Princeton University Press, 2016. — 364 p.
2. Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source / A. Hewish [et al.] // *Nature.* — 1968. — Vol. 217. — P. 709—713. — URL: <http://www.doi.org/10.1038/217709a0>.
3. *Lyne, A. Pulsar Astronomy / A. Lyne, F. Graham-Smith.* — Cambridge UK : Cambridge University Press, 2012. — 340 p.
4. *Downs, G. Interplanetary Navigation Using Pulsating Radio Sources / G. Downs // NASA Technical Report.* — 1974. — 32—1594 Oct. — P. 12.
5. *Emadzadeh, A. Navigation in Space by X-ray Pulsars / A. Emadzadeh, J. Speyer.* — Springer Science+Business Media, 2011. — xii, 118. — URL: <http://www.doi.org/10.1007/978-1-4419-8017-5>.
6. *Sheikh, S. The Use of Variable Celestial X-Ray Sources for Spacecraft Navigation. Dissertation submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy / S. Sheikh.* — 2005. — 604 p. — URL: <https://drum.lib.umd.edu/handle/1903/2856>.
7. *Becker, W. Autonomous Spacecraft Navigation with Pulsars / W. Becker, M. Bernhardt, A. Jessner // Acta Futura.* — 2013. — Vol. 7. — P. 11—28. — URL: <http://www.doi.org/10.2420/AF07.2013.11>.
8. *Zhen, W. X-ray Pulsar-based Navigation / W. Zhen, Y. Wang.* — Singapore : Springer, 2020. — URL: <http://www.doi.org/10.1007/978-981-15-3293-1>.
9. Autonomous Navigation of Mars Probes by Single X-ray Pulsar Measurement and Optical Data of Viewing Martian Moons / P. Ma [et al.] // *The Journal of Navigation.* — 2017. — Vol. 70. — P. 18—32. — URL: <http://www.doi.org/10.1017/S0373463316000357>.

10. *Ревнивцев М.Г., Гаджилы О.Э., Лутовинов А.А., Мольков С.В.* О возможности уточнения орбиты спутников по данным наблюдений одиночных рентгеновских пульсаров // Письма в АЖ. — 2015. — Т. 41, № 8. — С. 490—496. — URL: <http://www.doi.org/10.7868/S0320010815080069>.
11. Навигация по рентгеновским пульсарам в космическом пространстве / М. Сажин [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2018. — № 2. — С. 18—30.
12. *Аким Э.Л., Энеев Т.М.* Определение параметров движения космического летательного аппарата по данным траекторных измерений // Космич. исслед. — 1963. — Т. 1, № 1. — С. 5—50.
13. *Арефьев В.А., Федотов С.Н., Павлинский М.Н.* Оценка точности определения фазы импульса рентгеновского пульсара движущимся космическим аппаратом // Вторая Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов», 13–16 сентября 2010 г., Россия, Таруса / под ред. Г. Аванесова. — М., 2011. — С. 118—128.
14. *Christian, J.* StarNAV: Autonomous Optical Navigation of a Spacecraft by the Relativistic Perturbation of Starlight / J. Christian // Sensors. — 2019. — Vol. 19, no. 19. — P. 61. — URL: <http://www.doi.org/10.3390/s19194064>.
15. *Richter, G.* Second-order Contributions to Relativistic Time Delay in the Parametrized Post-Newtonian Formalism / G. Richter, R. Matzner // Physical Review. — 1983. — Vol. 28, no. 12. — P. 3007—3012.
16. *Belanger, G.* On More Sensitive Periodogram Statistics / G. Belanger // The Astrophysical Journal. — 2016. — Vol. 822, no. 1. — P. 1—11. — URL: <http://www.doi.org/10.3847/0004-637X/822/1/14>.
17. ИНТЕГРАЛ / INTEGRAL [Электронный ресурс]. — URL: <https://iki.cosmos.ru/research/missions/integral> (дата обр. 23.01.2024).
18. INTEGRAL [Электронный ресурс]. — URL: <https://sci.esa.int/web/integral> (дата обр. 23.01.2024).
19. INTEGRAL timing and localization performance / R. Walter [et al.] // Astronomy and Astrophysics: a European journal. — 2003. — Vol. 411, no. 1. — URL: <http://www.doi.org/10.1051/0004-6361:20031306>.
20. *Ватутин В.М., Ежов С.А., Захваткин М.В., Ивашина А.В., Молотов Е.П., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Тучин Д.А., Шишов В.А., Ярошевский В.С.* Навигация космических аппаратов при исследовании дальнего космоса : монография / под ред. Е. Молотова, А. Тучина. — М. : Радиотехника, 2016. — 232 с.

21. *Боровин Г.К., Голубев Ю.Ф., Грушевский А.В., Заславский Г.С., Захваткин М.В., Корянов В.В., Лавренов С.М., Морской И.М., Симонов А.В., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Тучин Д.А., Ярошевский В.С.* Баллистико-навигационное обеспечение полетов автоматических космических аппаратов к телам Солнечной системы : монография / под ред. А. Тучина. — Химки : АО «НПО Лавочкина», 2018. — 236 с.
22. Jodrell Bank Crab Pulsar Monthly Ephemeris [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/crab.html> (дата обр. 31.01.2024).