

УДК 551.521.17;629.197

А.А. Черемисин, Л.В. Границкий, В.А. Бартнев, **И.А. Агапов**

СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

Описана система для автономной навигации космических аппаратов (КА), позволяющая определять высоту лучей звезд над поверхностью Земли путем измерения со спутника затухания их блеска в ультрафиолетовом диапазоне длин волн (200÷300 нм) при наблюдении их захода за атмосферный лимб Земли. Погрешность высотной привязки линий визирования звезд обусловлена случайными «погодными» вариациями концентрации атмосферного озона в верхней атмосфере, с одной стороны, и недостаточностью модельных представлений об его изменчивости – с другой. Описаны элементы облика перспективной системы, позволяющей одновременно решать задачи автономной навигации КА и ориентации КА относительно звезд.

Существующий подход определения параметров движения космических аппаратов (КА) при астронавигации основан на измерении угловых расстояний между известными небесными ориентирами. При этом измеренные углы должны зависеть от положения КА в околоземном пространстве и не зависеть от их ориентации. В качестве небесных ориентиров берутся Земля, Солнце, звезды, а для измерения углового положения Земли используются приборы, работающие в ИК-или видимом диапазоне.

Использование инфракрасного прибора позволяет, в лучшем случае, определить вертикали с погрешностью около 3–5 угл.мин, что приводит к существенным погрешностям навигации. Другой подход в развитии астронавигации связан с измерением высоты луча над поверхностью Земли, направленного от КА на звезду в момент ее захода или восхода. Эта высота может определяться на основе измерения углов рефракции [1,2].

В Научно-исследовательском физико-техническом институте Красноярского государственного университета при участии Красноярского государственного технического университета ведутся разработки систем для определения астронавигационных параметров КА на основе определения высот лучей звезд над поверхностью Земли по измерениям блеска звезд в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне при их заходе за атмосферу Земли.

При наблюдении звезды с борта космического аппарата через атмосферу Земли происходит ослабление ее блеска в зависимости от высоты линии визирования над поверхностью Земли h . Коэффициент ослабления блеска

$$\eta(h) = I(h)/I_0,$$

где I_h, I_0 – величины сигналов с фотоприемного устройства при наблюдении звезды через атмосферу и вне атмосферы соответственно,

$$\eta(h) = \frac{\int_{\Lambda} E_{\lambda} F_{\lambda} \eta_{\lambda}(h) d\lambda}{\int_{\Lambda} E_{\lambda} F_{\lambda} d\lambda}, \quad (1)$$

где E_{λ} – спектральная освещенность, создаваемая звездой; F_{λ} – относительная спектральная чувствительность фотоприемного устройства (оптической системы); $\eta_{\lambda}(h)$ – спектральный коэффициент прозрачности атмосферы Земли; Λ – рабочий спектральный диапазон системы регистрации. Нами выбран УФ-диапазон 200÷300 нм по следующим причинам.

Для определения высоты линии визирования по измеряемому ослаблению блеска звезды необходимо, чтобы высотные зависимости ослабления блеска были достаточно стабильны. Коэффициент ослабления является функцией h и λ . При этом вариации спектральных коэффициентов прозрачности будут зависеть от вариаций атмосферных параметров на соответствующих высотах. Затухание блеска звезд в УФ-диапазоне обусловлено, главным образом, поглощением излучения атмосферным озоном и наблюдается на высотах 60÷80 км ($\lambda = 0,25$ мкм).

В видимом диапазоне ослабление блеска звезд наблюдается на высотах 20÷40 км и определяется, прежде всего, рэлеевским рассеянием, затем аэрозольным рассеянием и, в определенной мере, рефракционным ослаблением. При этом для УФ-диапазона в сравнении с видимым меньше сказывается влияние вариаций атмосферных параметров, таких как коэффициент аэрозольного рассеяния [3], на высотный ход кривых затухания блеска звезд и, следовательно, на точность привязки линии визирования.

В видимом диапазоне более существенно могут проявиться эффекты многократного рассеяния. Вследствие малых углов рефракции на больших высотах в УФ-диапазоне отсутствует наблюдаемое в

видимом диапазоне мерцание звезд, связанное с неоднородностями показателя преломления (температуры) в атмосфере [4]. В видимом диапазоне вследствие значительной величины углов рефракции по сравнению с УФ-диапазоном необходимо вводить значительную по величине поправку на отклонение лучей звезд, что приводит к дополнительным погрешностям, которые связаны с вариациями показателя преломления. Кроме того, яркость освещенной Солнцем части видимого с КА диска Земли в УФ-диапазоне на несколько порядков ниже, чем в видимом, что, как следствие, приводит к соответствующему уменьшению фона засветки [5].

Были проведены модельные расчеты кривых затухания блеска звезд для УФ-диапазона длин волн 200÷300 нм в зависимости от систематических сезонно-широтных и случайных «погодных» вариаций параметров атмосферы – высотных зависимостей концентрации озона [6], плотности атмосферы [7] и аэрозольного рассеяния [3]. Как показывают расчеты, высотная привязка экспериментальных кривых затухания блеска звезд в окрестности высоты 60 км приводит к средней погрешности, связанной с влиянием естественных «погодных» параметров атмосферы, не превышающей $\pm 0,5$ км. Но учет сравнительно мало изученного на больших высотах суточного хода изменения концентрации озона по данным, полученным в результате расчета в рамках фотохимических моделей [8], приводит к сдвигу кривых затухания блеска звезд примерно на 1,5 км.

При линейной суммарной погрешности $0,5 \div 2$ км с геостационарных орбит угловая погрешность привязки линии визирования звезды оценивается $2 \div 10$ угл.с. Необходимо также вводить поправку на рефракционное отклонение луча звезды [9], так как угол рефракции на этих высотах составляет величину порядка нескольких угловых секунд. При этом вариации угла рефракции из-за изменчивости атмосферных параметров по расчетам невелики – их относительная величина всего несколько процентов, и, таким образом, они не вносят существенного вклада в общую погрешность.

В качестве области, содержащей рабочие звезды для ультрафиолетового прибора, выбран участок небесной сферы: склонение от $-3,5^\circ$ до $+1,5^\circ$, прямое восхождение от 0 до 24 ч (вторая экваториальная система координат). Выборка рабочих звезд (U не слабее $+6,9^m$) проводилась по данным ультрафиолетового спектрофотометрического каталога TD1 [10] и его дополнения STD1, полученных на французском спутнике TD1.

Выбор приэкваториальной части небесной сферы в качестве области, содержащей рабочие звезды, связан с тем, что высотное распределение озона приэкваториального тропического типа обладает наибольшей стабильностью. Рабочая область указанного размера по склонению выбрана из более широкой приэкваториальной области как содержащая макси-

мальное число ярких звезд и имеющая максимальную их суммарную яркость по сравнению с другими вариантами выбора. Среди 57 рабочих звезд 8 являются переменными. Если изменение абсолютного блеска звезды не сопровождается относительными изменениями ее спектра, то использование переменных звезд не приводит к погрешности, так как измеряется относительная величина видимого изменения блеска звезд.

Как следует из выражения (1), для конкретного прибора, имеющего вполне определенную спектральную чувствительность F_λ , отличную от нуля в конечной области $\Delta\lambda$, высотное ослабление блеска каждой рабочей звезды будет описываться фактически индивидуальной кривой. То, что высотный ход кривых ослабления сигнала от звезд имеет сильную зависимость от кривых спектральной чувствительности используемого фотоприемного устройства (а также и от вида спектров самих звезд), видно из рис. 1, где приведена рассчитанная кривая (1) высотной зависимости ослабления сигнала для одной из рабочих звезд (№ 252 каталога [10], $\alpha = 5^h 40,8^m$, $\delta = -1^\circ 57'$).

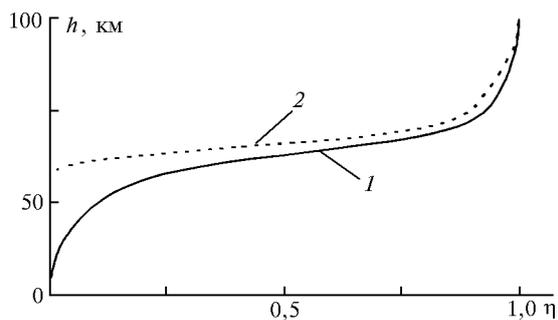


Рис. 1. Высотные зависимости ослабления блеска звезды № 252 [10] при ее заходе за атмосферу Земли: 1 – с учетом чувствительности конкретного фотоприемного устройства; 2 – для монохроматического света $\lambda = 255$ нм

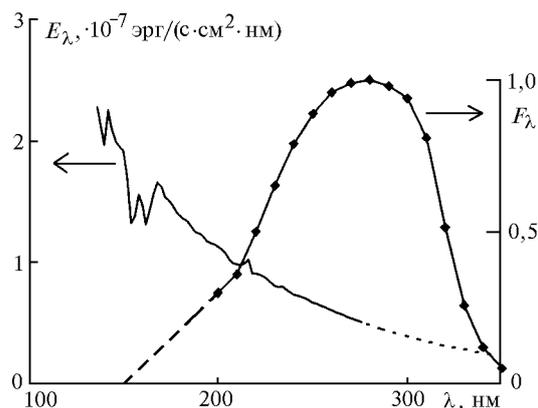


Рис. 2. Спектральная зависимость энергетической освещенности E_λ , создаваемой звездой № 252 [10]. F_λ – относительная спектральная чувствительность конкретного фотоприемного устройства

Спектральная зависимость энергетической освещенности, создаваемая этой звездой, представлена на рис. 2. При расчете кривой 1 использована экспе-

риментальная кривая спектральной чувствительности конкретного фотоприемного устройства, которое по своим параметрам может использоваться при проведении летных испытаний аппаратуры. Для сравнения на рис. 1 приведена рассчитанная высотная зависимость (кривая 2) ослабления сигнала от звезды для измерений в монохроматическом свете при $\lambda = 255$ нм.

Бортовое математическое обеспечение автономной навигации содержит два основных алгоритма определения высоты линии визирования звезды. Первый алгоритм служит для вычисления высоты по прогнозируемому положению спутника, определяемому при учете с необходимой точностью величин всех возмущений гeопотенциала. Этот алгоритм является точным численным алгоритмом. По второму алгоритму высота вычисляется по данным наблюдения затухания блеска звезды со спутника. В случае если кривые затухания блеска звезд, рассчитанные на данном этапе на основе имеющихся моделей атмосферы, содержат систематическую ошибку, то это приведет к систематическим погрешностям определения высоты линии визирования для всех наблюдаемых звезд, т.е. к корреляции ошибок измерений. Как известно [11], при автономной навигации по измерениям высот звезд над горизонтом, если ошибки определения высот независимы, распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием, то работа навигационного фильтра характеризуется тем, что среднеквадратические ошибки определения элементов орбиты пропорциональны ошибке одиночных измерений высот и обратно пропорциональны \sqrt{N} , где N – число наблюдений звезд. Если же ошибки измерений высот звезд коррелированы, то в наихудшем варианте точность определения навигационных параметров не будет улучшаться при увеличении числа наблюдений рабочих звезд.

Для отработки технических и методических аспектов рассматриваемого метода определения навигационных параметров КА были разработаны специальные экспериментальная аппаратура и программа проведения экспериментов с борта геостационарного спутника.

В методическом плане целью проведения экспериментов являются уточнение среднего высотного хода кривых затухания блеска звезд в сравнении с модельными кривыми, экспериментальное определение величины их вариаций, отработка алгоритмов определения навигационных параметров КА и экспериментальная оценка общей погрешности методики.

В перспективе, на следующем этапе разработки планируется создание системы, которая может позволить решать в автономном режиме одновременно задачу навигации КА и задачу высокочастотной ориентации КА относительно звезд. Система характеризуется малыми габаритами, весом и энергопотреблением, высокими точностными параметрами и представляет собой систему датчиков звездного поля,

работающих в ультрафиолетовом и видимом диапазонах под управлением видеоспецпроцессора.

На рис. 3 представлена схема широкоугольного оптического звездного датчика для автономной навигации и ориентации ИСЗ. Согласно расчетам датчик системы менисковый Кассегрен обладает высоким качеством изображения (на поле $2\omega \sim 7^\circ$ размер пятна изображения точечного источника не превышает 10 мкм). Датчик может работать с любым фотоприемным устройством благодаря большому выносу изображения, обладает плоским полем зрения, технологичен в изготовлении (все поверхности сферические). Материал мениска – плавленый кварц, с полосой пропускания до 200 нм. Диаметр объектива $D = 42,5$ мм, эквивалентное фокусное расстояние $F = 164,5$ мм, светосила $A = 3,87$. Предполагаемый размер матричного фотоприемного устройства (МФПУ) 1000×1000 пикселей.

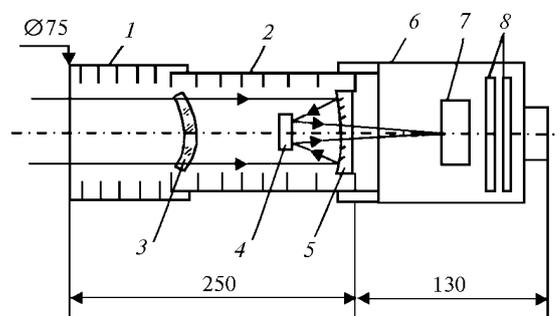


Рис. 3. Оптическая схема широкоугольного датчика: 1 – бленда с системой диафрагм; 2 – телескоп системы менисковый Кассегрен; 3 – мениск; 4 – вторичное зеркало; 5 – первичное зеркало; 6 – блок фотоприемного устройства (7 – матричное фотоприемное устройство; 8 – платы управления МФПУ)

За рубежом для задач астрономии разработана фоточувствительная ПЗС-матрица с числом элементов 2048×2048 [12]. Для более уверенного определения яркостей звезд их изображение предполагается дефокусировать [13]. Согласно расчетам при размере пятна $60 \div 80$ мкм ($3 \div 4$ пиксела МФПУ) угловой размер такого пятна будет иметь около 2 угл. мин. При предполагаемом отношении сигнал-шум методы математической обработки позволяют определить положение центра изображения звезды 4-й звездной величины до долей пиксела ($\sim 0,15$ пиксела). Точность определения углов может при этом возрастать на порядок. Датчик может работать как в УФ, так и в видимом диапазоне спектра. При этом МФПУ должно быть чувствительно к УФ-излучению и оснащено специальными светофильтрами, обеспечивающими мощное подавление излучения в видимом диапазоне. Конструкция бленд позволяет наблюдать звезды при удалении от Солнца на углы $> 30^\circ$. Вес датчика примерно 2 кг, энергопотребление – 3 Вт.

На рис. 4 представлены состав и конфигурация системы для автономной навигации и высокоточной ориентации КА. Как видно из рис. 4, в комплект вхо-

дют два 7° -х УФ датчика, направленных в район экватора, предназначенных для выполнения функции определения навигационных параметров по измерениям затухания блеска звезд при их заходе за атмосферу Земли. Они могут также выполнять функцию ориентации по кадру звездного неба. Использование двух УФ датчиков, направленных на край Земли, кроме возможности наблюдения затухания звезд в течение большей части времени суток является резервированием системы. Выход из строя одного из датчиков снижает результирующую точность (время) определения навигационных параметров в допустимых пределах. Функция датчиков 3 и 4 – ориентация КА относительно звезд. Использование датчика, направленного на Полярную звезду, позволяет вести высокоточное определение параметров ориентации КА круглосуточно, без перерыва, так как группа датчиков 1, 2 и датчик 4 смотрят приблизительно перпендикулярно друг другу и одновременно не могут ослепляться Солнцем. То обстоятельство, что датчики ориентированы в направлении трех перпендикулярных осей, является резервированием системы при решении задач ориентации. Отказ любого датчика по одному из направлений оставляет возможность определения ориентационных параметров КА. Более того, каждый из четырех датчиков позволяет осуществить трехосную ориентацию КА по кадру звездного неба, но с некоторым снижением точности.

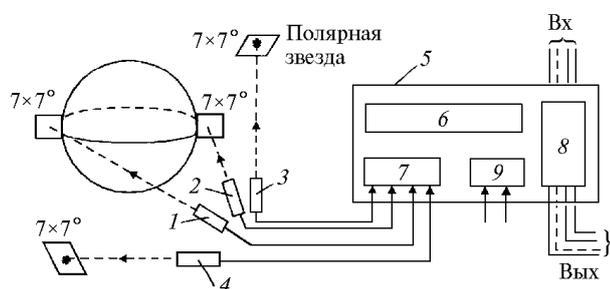


Рис. 4. Блок-схема системы для автономной навигации и ориентации ИСЗ: 1 – 4 – датчики звездного поля (1, 2 – УФ-датчики, направленные в район экватора; 3 – датчик (УФ или видимый), направленный на Полярную звезду; 4 – датчик (УФ или видимый), ось которого параллельна вектору скорости КА); 5 – электронный блок (6 – видеопроцессор; 7 – блок управления датчиками; 8 – блок сопряжения с бортовой телеметрической системой КА; 9 – блок питания)

Структура электронного блока обеспечивает единое функциональное решение задач навигации и ориентации. Каждый датчик оснащен схемой управления (формирования видеосигнала) с матриц ФПУ датчика 1000×1000 (элементов). Все датчики сопряжены с одним и тем же электронным блоком, отдельно размещенным на борту КА. В состав этого электронного блока входит спецпроцессор для обработки видеoinформации (видеоспецпроцессор либо типа 1815 отечественного производства, либо, что предпочтительнее, типа, выпускаемого фирмой

«Texas Instruments»), а также процессор (типа 1806) для управления аппаратурой и связи с БЦВМ и другими бортовыми системами. Основные функции видеоспецпроцессора определяются структурой обработки кадра звездного неба.

Обработка кадра изображения включает: выравнивание – приведение значений интенсивности сигналов для элементов изображения к одному среднему значению чувствительности, фильтрацию и оптимальное линейное обнаружение двумерных импульсов изображений звезд, коррекцию – исправление искажений изображения, обусловленных полевыми аберрациями, прежде всего дисторсией и комой; распознавание. Процедура распознавания включает: выделение на кадре самой яркой звезды; вычисление вектора признаков – центральных расстояний (расстояний между опорной и другими менее яркими звездами кадра, взятыми в порядке убывания яркости); идентификацию – нахождение среди векторов эталонных участков звездного неба такого, который максимально совпадает с исходным. По положению отождествленного участка звездного неба в сравнении с эталонным определяются параметры ориентации КА (тангаж, рыскание, крен) и отождествляются рабочие звезды.

Как показывают результаты проведенных нами статистических экспериментов, центральные расстояния в качестве вектора признаков для отождествления участка звездного неба по совокупности характеристик – одновременной устойчивости к средним и максимальным ошибкам определения координат центров звезд – не уступают таким признакам, как угловые расстояния между звездами [13]. Но центральные расстояния более устойчивы также к неточности определения блеска и к наличию в кадре лишних либо потере действительных звезд. Этот фактор является важным, так как многие навигационные звезды являются переменными, а также возможно попадание в кадр частиц космического мусора [14]. Расчеты проводились по данным каталога звезд Смитсоновской астрофизической обсерватории [15].

Таким образом, система датчиков звездного поля, работающих в ультрафиолетовом и видимом диапазонах под управлением видеоспецпроцессора, может одновременно решать задачи автономной навигации и ориентации КА. Система имеет относительно небольшие габариты, энергопотребление и массу.

1. Chory M.A., Hoffman D.P., Major C.S., Spektor V.A. // AIAA Pap. 1984. N 1826.
2. Goundley R., White R., Gai E. // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 1984. V. 7. N 2.
3. Креков Г.М., Звенигородский С.Г. Оптическая модель средней атмосферы. Новосибирск: Наука, 1990. 278 с.
4. Александров А.П., Гречко Г.М., Гурвич А.С. и др. // Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. N 1. С. 5–16.
5. Границкий Л.В., Черемисин А.А., Бартнев В.А., Ильиных А.М. Мониторинг космического мусора в ультрафиолетовом диапазоне // Оптика атмосферы и океана. В печати.

6. *Keating G.M., Young D.T. and Pitts M.C.* // Adv. Space Res. 1987. V. 7. N 10. P. (10)105–(10)115.
7. *Рамазов А.А., Сихарулидзе Ю.Г.* Глобальная модель вариаций плотности атмосферы Земли. М., 1979. 30 с. (Препринт/ИПМ, N 73).
8. *Herman J.R.* // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. N 7. P. 3701–3710.
9. *Островский А.Л., Джуман Б.М., Заболотский Ф.Д., Кравцов Н.И.* Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения. М.: Недра, 1990. 235 с.
10. *Ultraviolet Bright-Star Spectrometric Catalogue.* European Space Agency, 8–10, rue Mario-Niris, 75 738, Paris Cedex 15. France.
11. *Ивашкин В.В.* // Космические исследования. 1985. Т. 23. Вып. 6. С. 803–813.
12. *Уокер Г.* Астрономические наблюдения. М.: Мир, 1990. 352 с.
13. *Аванесов Г.А., Алексакин Е.П., Алексакина Г.А.* и др. // Оптико-электронные приборы в космических экспериментах. М.: Наука, 1983. С. 124–157.
14. *Иванов В.Л., Меньшиков В.А., Пчелинцев Л.А., Лебедев В.В.* Космический мусор. Т. 1. М.: Патриот, 1996. 360 с.
15. *Roman N.G., Warren W.H., Sr.* Smithsonian astrophysical observatory star catalog. Version 1984, NSSOC/WDC-A-R&S. 84-02, January 1984.

Научно-исследовательский физико-технический институт
Красноярского государственного университета,
Красноярский государственный технический университет,
Научно-производственное объединение «Прикладная механика»,
г. Железногорск Красноярского края

Поступила в редакцию
3 декабря 1997 г.

A.A. Cheremisin, L.V. Granitsky, V.A. Bartenev, I.A. Agapov. **Satellite Navigation Systems of Ultraviolet Wavelength Range.**

Systems for autonomous navigation of spacecrafts, based on determination of heights of the star lines of sighting above the Earth's surface by means of measurements of atmospheric attenuation of star brightness in the ultraviolet wavelength range of 200–300 nm is described. The inaccuracy of height affixment of star lines of sighting is caused both by the «weather» variations of atmospheric ozone concentration in the upper atmosphere and by insufficiency of ozone variability models. Configuration and elements of promising system, allowing one to solve simultaneously the problems of autonomous spacecraft navigation and its orientation relative to stars, are described.