

Моделирование телевизионного звездного координатора

И.В. Лазарев

Аннотация

Описывается моделирование работы телевизионного звездного координатора (ТЗК). Рассматриваются вопросы построения проекции визируемого участка звездного неба. Проводится расчет оптического сигнала на поверхности фотоприемного устройства (ФПУ), исходящего от звезды с произвольным блеском. Имитируются преобразование светового сигнала в электрический и процессы распознавания наблюдаемых звезд с целью вычисления ориентации космического аппарата (КА).

Ключевые слова

телевизионный звездный координатор; космический аппарат; оптико-электронный прибор; ориентация; распознавание групп звезд

Введение

Для решения задач управления пространственной ориентацией и навигацией космических аппаратов (КА) используются автономные наземные и бортовые системы первичной навигационной информации. Одним из средств для получения такой информации являются системы ориентации, основанные на оптико-электронных приборах [1, 2]. С помощью этих приборов можно определять направление осей навигационной системы координат, углы и угловые скорости отклонения осей КА и другие параметры. Среди оптико-электронных приборов ориентации можно выделить отдельную группу, принцип работы которой основан на визировании звездного поля – телевизионные звездные координаторы (ТЗК). Разработка ТЗК – актуальная задача [3]. Представляет интерес моделирование работы ТЗК с целью оптимизации основных характеристик и параметров этих приборов.

В общем виде ТЗК состоит из нескольких блоков [2]: оптической системы (объектива), фотоприемного устройства (ФПУ), бортового компьютера и управляющих устройств (рис. 1). Объектив фокусирует в плоскости ФПУ свет, исходящий от попавших в поле зрения

небесных светил (звезд, Солнца, Земли и планет). Формируемый ФПУ электрический сигнал, соответствующий определенному участку звездного неба, поступает на вход бортового компьютера, который вычисляет ориентацию КА и вырабатывает управляющие сигналы, передаваемые на исполнительные устройства. Задача ориентации – сохранение определенного положения КА относительно заданной системы координат.

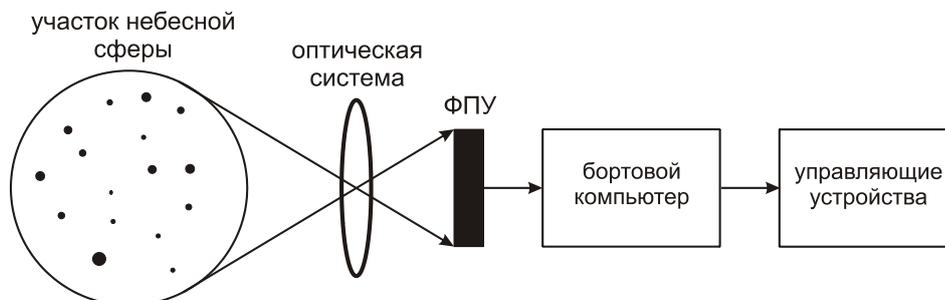


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема системы ориентации

Информационный подход к ориентации КА [4] предполагает вычисление матрицы перехода от связанной с КА системы координат к базовой, имеющей общее начало со связанной системой. Вычисление матрицы перехода осуществляется на основе определения кинематических параметров ориентации в виде направляющих косинусов, углов Эйлера, углов Эйлера-Крылова или кватернионов. Кинематические параметры могут быть измерены при одновременной фиксации как минимум двух неколлинеарных векторов (направлений на звезды), ориентация которых относительно базовой системы координат известна [4, 5]. В качестве базовой, как правило, используется орбитальная система координат $Ox_0y_0z_0$ (рис. 2).

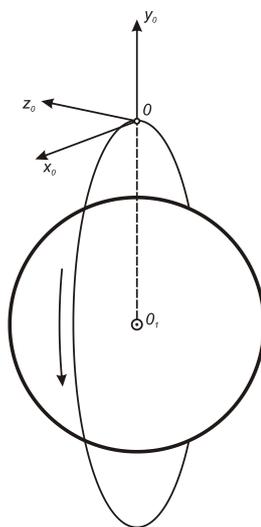


Рис. 2. Орбитальная система координат

Принцип работы приборов ориентации по звездному полю основан на постоянстве картины звездного неба. Взаимное расположение звезд с течением времени практически не меняется. Для задачи распознавания групп звезд признаком, позволяющим наиболее достоверно отличить одну группу от другой, является взаимное угловое расстояние между звездами [6]. Другие признаки (такие, как звездная величина и спектральный класс) в общем случае не могут обеспечить достоверного распознавания. В процессе работы ТЗК бортовой компьютер производит распознавание группы визируемых светил и отбирает наиболее подходящие по угловым расстояниям звезды, на основе которых вычисляется ориентация КА.

Цель работы – описание основных этапов физической работы ТЗК как теоретической базы моделирования:

- 1) выделение визируемого участка звездного неба,
- 2) расчёт оптического сигнала на поверхности ФПУ,
- 3) преобразование оптического сигнала в электрический.

Визируемый участок звездного неба

Основными объектами, визируемыми ТЗК в космосе, являются звезды. Из общего количества звезд в нашей галактике в каталоге HIPPARCOS [7, 8] содержится информация о 118 218 звездах (включая все звезды до 7^m). Можно показать, что для моделирования систем ориентации с широким и нормальным полем зрения этих данных достаточно. Для моделирования систем ориентации с узким полем зрения можно воспользоваться каталогом TYCHO [7].

Для моделирования ТЗК в первую очередь необходимы небесные координаты звезд и их видимые звездные величины [1, 2]. Спектральный класс звезд не носит принципиального характера и в общем случае для устройств с широкой спектральной чувствительностью незначительно влияет на яркость изображения звезды, что можно учесть в уравнениях преобразования оптического сигнала в электрический в виде некоторого постоянного коэффициента.

Пусть оси прибора ориентации совпадают с осями положения КА, его оптическая ось совпадает с осью Oz , а оси Ox и Oy с горизонтальной и вертикальной осями в фокальной плоскости оптической системы соответственно. В каталогах координаты звезд, как правило, представлены в экваториальной системе в виде прямого восхождения α и склонения δ [8]. Так как в процессе моделирования необходимо проводить пересчет координат из одной системы в другую, координаты звезд удобно представить в декартовой системе координат в виде единичных векторов, рассчитывающихся как

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \\ \cos \delta \cos \alpha \end{bmatrix}.$$

В этом случае направление на точку с координатами $\alpha = 0^\circ$ и $\delta = 0^\circ$ будет совпадать с осью Oz .

Положение КА в пространстве относительно базовой системы координат можно описать в виде трех ортогональных векторов или матрицы

$$\mathbf{B} = [\mathbf{b}_x \quad \mathbf{b}_y \quad \mathbf{b}_z] = \begin{bmatrix} b_{xx} & b_{yx} & b_{zx} \\ b_{xy} & b_{yy} & b_{zy} \\ b_{xz} & b_{yz} & b_{zz} \end{bmatrix}.$$

Если исходное положение КА задается в орбитальной системе координат в виде углов Эйлера-Крылова (углы рысканья ψ , тангажа θ и крена γ), то

$$\mathbf{B} = \mathbf{R}(\psi, \theta, \gamma) \cdot \mathbf{I},$$

где \mathbf{I} - единичная матрица (векторы совпадают с осями системы координат), а $\mathbf{R}(\psi, \theta, \gamma)$ - обобщенная матрица поворотов, вычисляемая как последовательное перемножение матриц поворотов на углы γ, θ, ψ вокруг осей Oz, Ox, Oy соответственно.

Положение КА в экваториальной системе

$$\mathbf{Q} = \mathbf{R}_{\mathbf{BQ}} \cdot \mathbf{B},$$

где $\mathbf{R}_{\mathbf{BQ}}$ - матрица перехода из орбитальной в экваториальную систему, определяемая на основе параметров орбиты и текущего положения КА.

Можно показать, что углы рыскания и тангажа, описывающие положение КА в экваториальной системе, равны

$$\psi_Q = \arctan\left(\frac{q_{zx}}{q_{zz}}\right),$$

$$\theta_Q = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{q_{zy}}{\sqrt{q_{zx}^2 + q_{zy}^2 + q_{zz}^2}}\right),$$

где q_{zx}, q_{zy}, q_{zz} - компоненты вектора $\mathbf{q}_z \in \mathbf{Q}$.

Для определения угла крена необходимо вычислить вспомогательную матрицу

$$\mathbf{Q}' = \mathbf{R}_{Oy}(\psi_Q) \cdot \mathbf{R}_{Ox}(\theta_Q) \cdot \mathbf{I},$$

где $\mathbf{R}_{O_y}(\psi_Q)$ - матрица поворота на угол ψ_Q вокруг оси Oy , $\mathbf{R}_{O_x}(\theta_Q)$ - матрица поворота на угол θ_Q вокруг оси Ox . Фактически \mathbf{Q}' описывает положение КА в экваториальной системе без крена. Сопоставляя \mathbf{Q} и \mathbf{Q}' , несложно найти угол крена

$$\gamma_Q = \begin{cases} \arccos(q_{yx}q'_{yx} + q_{yy}q'_{yy} + q_{yz}q'_{yz}), & \text{если } \arccos(q_{yx}q'_{xx} + q_{yy}q'_{xy} + q_{yz}q'_{xz}) \geq 90^\circ \\ -\arccos(q_{yx}q'_{yx} + q_{yy}q'_{yy} + q_{yz}q'_{yz}), & \text{если } \arccos(q_{yx}q'_{xx} + q_{yy}q'_{xy} + q_{yz}q'_{xz}) < 90^\circ \end{cases}$$

где q_{yx}, q_{yy}, q_{yz} - компоненты вектора $\mathbf{q}_y \in \mathbf{Q}$, $q'_{yx}, q'_{yy}, q'_{yz}$ - компоненты вектора $\mathbf{q}'_y \in \mathbf{Q}'$, $q'_{xx}, q'_{xy}, q'_{xz}$ - компоненты вектора $\mathbf{q}'_x \in \mathbf{Q}'$.

Для моделирования изображения участка звездного неба необходимо рассчитать проекцию светил на плоскость ФПУ. В идеальной оптической системе изображение формируется по законам центральной проекции [9]. Прежде чем переходить к расчету проекций, необходимо перевести координаты звезд \mathbf{s} из эталонной экваториальной системы координат в систему, связанную с оптическим прибором:

$$\mathbf{s}' = \mathbf{R}(-\psi_Q, -\theta_Q, -\gamma_Q) \cdot \mathbf{s},$$

где $\mathbf{R}(-\psi_Q, -\theta_Q, -\gamma_Q)$ - обобщенная матрица обратных поворотов на заданные углы.

Для экономии вычислений следует отбросить из рассмотрения все звезды, выходящие за угол поля зрения оптического прибора ω , т.е. не удовлетворяющие неравенству

$$\arccos(s'_z) \leq \frac{\omega}{2},$$

где s'_z - компонента вектора $\mathbf{s}' = \begin{bmatrix} s'_x \\ s'_y \\ s'_z \end{bmatrix}$.

Пусть центр проекционной системы координат $x_p = 0, y_p = 0$ расположен в центре светочувствительной области ФПУ, а направления осей Ox_p и Oy_p совпадают с направлениями проекций осей Ox и Oy на фокальную плоскость. Перед расчетом координат проекций светил необходимо масштабировать исходные координаты

$$\mathbf{s}'' = \mathbf{M}_p \cdot \mathbf{s}' = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{\omega_l}{2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & \tan^{-1}\left(\frac{\omega_h}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{s}'$$

где ω_l и ω_h - углы поля зрения оптической системы в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно. Если известна ширина l и высота h светочувствительной области ФПУ, то

$$\omega_l = \omega \frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}},$$

$$\omega_h = \omega \frac{h}{\sqrt{l^2 + h^2}}.$$

Координаты проекций светил на плоскость ФПУ

$$p_x = \frac{s_x''}{s_z''} \cdot \frac{l}{2},$$

$$p_y = \frac{s_y''}{s_z''} \cdot \frac{h}{2},$$
(1)

где s_x'', s_y'', s_z'' - компоненты вектора \mathbf{s}'' .

Приведённые формулы позволяют рассчитать координаты проекций светил на плоскость ФПУ в идеальной оптической системе в зависимости от заданного положения КА на орбите. В реальной оптической системе координаты проекций могут быть искажены вследствие оптических aberrаций (в частности, дисторсии). Моделирование искажений оптического сигнала удобно рассматривать в плоскости ФПУ с привлечением математического аппарата полиномов Цернике [10].

Оптический сигнал на поверхности ФПУ

На данном этапе рассчитываются форма и величина оптического сигнала, полученного от точечного источника света, прошедшего через объектив и попавшего на поверхность ФПУ. Так как спектральные характеристики ФПУ отличны от спектральной чувствительности человеческого глаза, то расчет оптического сигнала следует вести не в фотометрических величинах, а в энергетических. Основным параметром системы энергетических величин является поток излучения Φ [11], в общем случае зависящий от длины волны λ и характеризующийся определенным спектром. Так как с точки зрения алгоритмов распознавания групп звезд спектр излучения звезды и ее яркость являются вспомогательными параметрами [1,2], поток излучения Φ будет рассматриваться как некоторая интегральная характеристика.

Чтобы определить поток излучения $\Phi_{\text{вых}}$, прошедший через оптическую систему, необходимо вначале найти входной поток излучения $\Phi_{\text{вх}}$, исходящий от звезды. В астрономии яркостной характеристикой звезд принята видимая звездная величина или блеск m [12]. Для

расчета освещенности E_v , создаваемой звездой с произвольным блеском m_v на бесконечно малой поверхности, необходимо задать эталонную звезду. Если в качестве эталонной выбрать Канопус, имеющую $m_e = -0,72^m$ и создающую энергетическую освещенность $E_e = 6,3 \cdot 10^{-12}$ Вт/см² [13], то из формулы Погсона [12] можно вывести энергетическую освещенность, создаваемую на входе оптической системы

$$E_v = E_e \cdot 10^{\frac{m_e - m_v}{2,5}}. \quad (2)$$

В дальнейших расчётах принято допущение о том, что все звезды обладают таким же спектром излучения, как Канопус.

Пусть поток излучения Φ_{ex} параллелен оптической оси. Тогда, интегрируя функцию энергетической освещенности по площади поверхности, на которую падает излучение, входной поток излучения рассчитывается как

$$\Phi_{ex} = E_v \frac{\pi D^2}{4}, \quad (3)$$

где D – диаметр входного зрачка в см. В общем случае, если поток излучения падает на поверхность оптической системы под углом, то Φ_{ex} уменьшается при увеличении этого угла. В рамках данной работы этот факт не учитывается.

Ослабление потока излучения оптической системой характеризуется светопропусканием оптики, обусловленным светорассеянием и отражением света от поверхностей оптических элементов. В качестве характеристики ослабления светового потока можно использовать заранее оцененный коэффициент. Тогда

$$\Phi_{вых} = \Phi_{ex} k_0, \quad (4)$$

где k_0 - коэффициент пропускания оптики. Подстановка (2) в (3), а затем в (4) даёт выходной поток излучения

$$\Phi_{вых} = \frac{\pi D^2}{4} k_0 E_e \cdot 10^{\frac{m_e - m_v}{2,5}}. \quad (5)$$

В идеальной оптической системе поток излучения $\Phi_{вых}$ собирался бы в одну точку, расположенную в фокальной плоскости [14]. В реальной оптической системе на структуру изображения влияют дифракция и оптические aberrации. Функцию распределения освещенности E_p в изображении точки в оптике часто называют функцией рассеяния точки (ФРТ) [15]. Очевидно, что

$$\Phi_{\text{вых}} = \iint_{x_p, y_p} E_p(x_p, y_p) dx_p dy_p, \quad (6)$$

где x_p, y_p - координаты в фокальной плоскости, введенные в предыдущем разделе.

Наиболее распространенная и простая модель ФРТ – двумерная кривая Гаусса. Полагая, что радиус пятна $r = 3\sigma_1 = 3\sigma_2$ в см, коэффициент корреляции $\sigma_{12} = 0$ и учитывая (6), можно записать функцию распределения освещенности

$$E_p(x_p, y_p) = \Phi_{\text{вых}} \frac{9}{2\pi r^2} \exp\left\{-\frac{9}{2r^2}((x_p - p_x)^2 + (y_p - p_y)^2)\right\}, \quad (7)$$

где p_x, p_y - координаты центра изображения звезды в см, вычисленные по (1). Подстановка (5) в (7) даёт конечное уравнение, описывающее распределение освещенности

$$E_p(x_p, y_p) = \frac{\pi D^2}{4} k_0 E_e \cdot 10^{\frac{m_e - m_v}{2.5}} \cdot \frac{9}{2\pi r^2} \exp\left\{-\frac{9}{2r^2}((x_p - p_x)^2 + (y_p - p_y)^2)\right\}. \quad (8)$$

Для моделирования оптического сигнала на поверхности ФПУ необходимо для каждой визируемой звезды рассчитать параметры уравнения (8).

Двумерная кривая Гаусса в общем случае является довольно грубым приближением. На форму пятна рассеяния влияют различные виды оптических aberrаций (сферическая, хроматическая, кома, астигматизм и прочие) и она может зависеть от координат p_x, p_y проекции светила. В частном случае ФРТ необходимо рассчитывать на основе оптической схемы объектива.

Преобразование оптического сигнала в электрический

Одним из наиболее распространенных ФПУ является ПЗС-матрица [2]. ПЗС-матрица состоит из светочувствительных фотодиодов, организованных в решетчатую структуру. Каждый фотодиод соответствует пикселю изображения. В процессе экспонирования в потенциальных ямах фотодиодов накапливается заряд электронов, соответствующий количеству попавших на них фотонов. Если сигнал на выходе фотодиода измерять в количестве электронов [16], то

$$N_s = \eta k_u N_\phi, \quad (9)$$

где η - квантовый выход, N_ϕ - количество принятых фотонов, k_u - коэффициент использования спектра излучателя. Такой подход обеспечивает оценку предельных характеристик фотоэлектронного тракта.

Расчет, проведенный в [16] показывает, что для эталонной звезды Канопус и создаваемой ей энергетической освещенности $E_e = 6,3 \cdot 10^{-12}$ Вт/см², средняя интенсивность потока фотонов $N_e = 2,3 \cdot 10^{-7}$ см⁻²с⁻¹. Тогда коэффициент преобразования освещенности в количество фотонов

$$k_\phi = \frac{N_e}{E_e} = 3,65 \cdot 10^4 \text{ Вт}^{-1}\text{с}^{-1}.$$

Каждый фотодиод ПЗС-матрицы характеризуется размером светочувствительной области. Между фотодиодами могут быть нечувствительные к свету перегородки. Пусть светочувствительная область прямоугольная, l_ϕ и h_ϕ - ее ширина и высота, а c_x и c_y - координаты центра фотодиода в системе проекционных координат x_p, y_p . Как правило, в ТЗК ФРТ задается таким образом, чтобы засветить группу соседних ячеек [2]. Это позволяет в дальнейшем улучшить точность оценки координат изображения звезды [17-19]. Тогда количество фотонов, упавших на фотодиод

$$N_\phi = k_\phi \int_{a_0}^{a_1} \int_{b_0}^{b_1} E_p(x_p, y_p) dx_p dy_p,$$

где $a_0 = c_x - \frac{l_\phi}{2}$, $a_1 = c_x + \frac{l_\phi}{2}$, $b_0 = c_y - \frac{h_\phi}{2}$, $b_1 = c_y + \frac{h_\phi}{2}$, а $E_p(x_p, y_p)$ - зависимость (8). Подстановка полученного выражения в (9) задаёт количество электронов на выходе фотодиода

$$N_s = \eta k_u k_\phi \int_{a_0}^{a_1} \int_{b_0}^{b_1} E_p(x_p, y_p) dx_p dy_p. \quad (10)$$

Моделирование электрического сигнала на выходе ФПУ с помощью (10) сводится к нахождению интегральной величины освещенности на поверхности каждого фотодиода матрицы и умножению ее на определенные заранее коэффициенты. Далее дискретизированное матричной структурой изображение звезды суммируется с сигналами помех, формируемыми на фотодиодах. Помехи представляют собой сумму [16]:

- постоянного сигнала, уровень которого определяется темновым током;
- коррелированной гауссовой помехи, определяемой неравномерностью чувствительности и неравномерностью темнового тока;
- временного некоррелированного гауссова шума, обновляемого на каждом кадре;
- шума дискретизации, возникающего при преобразовании сигнала в цифровое представление.

Методы распознавания визируемого участка звездного неба

Можно выделить несколько основных задач преобразования электрического сигнала в оценки угловых координат.

1. Анализ выходного сигнала ФПУ и выделение изображений точечных источников света. Обнаружение полезных сигналов на фоне шума, как правило, осуществляется с помощью скользящего окна [16].

2. Оценка центров изображений точечных источников света с помощью специальных методов [17-19]. Для успешной реализации этих методов необходима расфокусировка пятна рассеяния света на несколько соседних элементов ФПУ.

3. Оценка вспомогательных параметров (например, блеска), которые могут использоваться для улучшения селективных свойств алгоритмов распознавания групп звезд.

4. Определение угловых координат визируемых светил относительно оптической оси прибора. Осуществляется с помощью обратной перспективной проекции. На данном этапе может потребоваться корректировка координат центров изображений для уменьшения влияния оптических искажений на погрешности определения координат.

5. Отбор наиболее перспективных светил для распознавания. При этом наиболее критичными факторами являются взаимные угловые расстояния между звездами и оценки их блеска.

6. Распознавание выбранной группы светил по взаимным угловым расстояниям [20].

7. Вычисление параметров ориентации КА путем сопоставления исходных и эталонных координат светил.

8. Определение матрицы перехода от связанной с КА системы координат к базовой.

Перечисленные задачи нуждаются в алгоритмизации и фактически составляют суть моделирования ТЗК. Примеры моделирования приведены в работах [2, 16-20]. Разработанные алгоритмы [17, 18, 20] позволяют проводить моделирование процесса работы ТЗК с точностью, соответствующей требованиям картографирования, посадки и стыковки искусственных спутников Земли [4] с погрешностью порядка угловых минут.

Таким образом, модель ТЗК можно определить как последовательность вычислений координат проекций визируемых небесных светил, расчет по формулам (8) и (10) оптического сигнала на поверхности ФПУ и электрического на его выходе, распознавание групп звезд на полученном изображении и вычисление ориентации КА в пространстве.

Выводы

Описанная последовательность вычислений:

- 1) имитирует произвольный участок звездного неба, фотоэлектронный тракт и позволяет исследовать алгоритмы распознавания групп звезд;
- 2) позволяет имитировать работу ТЗК при движении КА по орбите и управление ориентацией КА;
- 3) позволяет выбрать параметры аппаратной части ТЗК.

Библиографический список

1. Малинин В. В., Фалеев А. В. Оптико-электронные системы ориентации по звездному полю // Опт. журн. – 1996. - №10. С. 28-31.
2. Малинин В. В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных преобразователей с фотоприемными матрицами. – Новосибирск: Наука. – 2005. – 256 с.
3. Телевизионные звездные координаторы (Краткий обзор) / Г. А. Аванесов, Я. Л. Зиман, И. В. Полянский, А. А. Форш. М., 2001. – Препринт-2038.
4. Орбитальное гирокомпасирование/ В. А. Бесекерский, В. А. Иванов, Б. Б. Самотокин; Под ред. Б. Б. Самотокина. СПб.: Политехника, 1993. – 256 с.
5. Николаев А.Г., Забелина И.А. и др. Основы проектирования космических секстантов. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.
6. Осипик В.А., Федосеев В.И. Алгоритмы автоматического распознавания групп звезд на борту космического аппарата// Опт. журн. – 1998. - № 8. - С. 56-61.
7. The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. V.1 -16. ESA, 1997.
8. Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos: Учебно-метод. пособие. – СПб., 2005. – 104 с.
9. Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии/ А.А. Киселев. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1989 г. – 264 с.
10. Ежова, К.В. Математическое моделирование фотограмметрической дисторсии/ К.В. Ежова // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2006. – Вып. 26. – С.235- 239.
11. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Машиностроение, 1989 г. – 360 с.
12. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: Учебное пособие / Под ред. В.В. Иванова. Изд. 2-е, испр. М.: Едиториал УРСС, 2004. - 544 с.

13. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978 г. – 400 с.
14. Астрономическая оптика. Максutow Д. Д., М.: «Наука», 1979. – 395 с.
15. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. - 270 с.
16. Ежов О.М. Моделирование процессов формирования и обработки сигнала в звездном приборе с матричным фотоприемником// Опт. журн. – 1996. - №7. С. 30-34.
17. Лазарев И.В. Дискриминационный метод повышения точности звездных координаторов с ПЗС-матрицами// Известия вузов. Приборостроение. 2011. №8. С. 30-34
18. Лазарев И.В. Сравнение методов определения координат точечного объекта звездными координаторами// Научная сессия ГУАП: Сб. докл.: В 3 ч. Ч. I. Технические науки/ СПб.: ГУАП, СПб., 2011. С. 74-76.
19. Пашков В.С. Солнечный датчик на ПЗС-матрице// Механика, управление и информатика. - 2009. - № 1. С. 124-130.
20. Воробьев С.Н. Лазарев И.В. Алгоритм распознавания конфигураций звезд// Информационно-управляющие системы. 2008. №2. С. 2-8.

Сведения об авторах

Лазарев Игорь Владимирович, ассистент кафедры Информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского университета аэрокосмического приборостроения.

СПбГУАП, Ул. Большая Морская, 67, Санкт-Петербург, 190000.

тел.: 8-906-256-10-43; e-mail: igor@pentaxist.ru