

УДК 629.78 : 681.51

**ПРЕЦИЗИОННАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ
В ОРБИТАЛЬНОМ ТЕЛЕСКОПЕ ЗЕМЛЕОБОЗОРА**

© 2016 Е.И. Сомов, С.А. Бутырин

Самарский научный центр Российской академии наук

Статья поступила в редакцию 06.12.2016

Рассматривается система стабилизации скорости движения изображения, встроенная в орбитальный телескоп, который применяется для сканирующей оптико-электронной съемки наземных объектов. Выполнен синтез алгоритмов дискретной фильтрации сигнальной информации, кратко указаны цифровые законы управления пьезокерамическим приводом с учетом временного запаздывания. Представлены результаты по эффективности встроенной системы стабилизации скорости движения изображения.

Ключевые слова: космический землеобзор, скорость движения изображения, стабилизация

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-08-01091)
и отделения энергетики, механики, машиностроения и проблем управления РАН
(программа фундаментальных исследований № 13).*

ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается космический аппарат (КА) землеобзора, оснащенный телескопом с матрицами оптико-электронных преобразователей (ОЭП) в его фокальной плоскости. При съемке заданных участков поверхности Земли совокупностью маршрутов их сканирования телескопом матрицы ОЭП «работают» в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). К системе управления ориентацией (СУО) маневрирующего спутника землеобзора предъявляются уникальные требования по точности стабилизации его движения при сканирующей оптико-электронной съемке. Для решения этой проблемы обычно применяются астроинерциальная система определения углового положения спутника и силовой гироскопический комплекс на основе избыточного числа гиродинов [1]. Между тем в космической технике оптико-электронного наблюдения известен принципиально другой способ стабилизации движения изображения. Он основан на применении в оптической схеме телескопа компенсатора движения изображения (КДИ), изменение положения которого приводит к смещению лучей, формирующих изображение. Для космических телескопов наиболее рациональным является

КДИ в виде плоского зеркала, расположенного вблизи фокальной плоскости (ФП) телескопа [2]. При совместной работе (i) СУО спутника и (ii) встроенной в телескоп системы стабилизации движения оптического изображения требуемая точность достигается нониусным способом: I каскад – стабилизация углового движения объектива телескопа, II каскад – стабилизация движения изображения в ФП телескопа [3,4].

В статье впервые исследуется система стабилизации скорости движения изображения (СДИ), встроенная в орбитальный телескоп, который применяется для сканирующей оптико-электронной съемки наземных объектов. Здесь принципиальные проблемы состоят в синтезе алгоритмов обработки сигналов для офсетного гидирования по скорости изображения в центре фокальной плоскости телескопа, в разработке математической модели привода для прецизионных перемещений КДИ и алгоритмов цифрового управления.

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ СДИ

Используются стандартные системы координат (СК) – инерциальная (ИСК) с началом в центре Земли, геодезическая гринвичская (ГСК), горизонтная (ГорСК) с эллипсоидальными геодезическими координатами L, B и H , орбитальная (ОСК) и связанная с КА (ССК) системы координат с началом в его центре масс O . Вводятся телескопная СК (ТСК, базис S) с началом в центре оптического проектирования S , СК поля изображения $O_i x^i y^i z^i$ (ПСК, базис F) с началом в

Сомов Евгений Иванович, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела «Динамика и управление движением» СамНЦ РАН.

E-mail: e_somov@mail.ru

Бутырин Сергей Анфимович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела «Динамика и управление движением» СамНЦ РАН.

E-mail: butyrinsa@mail.ru

центре O_i ФП телескопа и визирная СК (ВСК, базис V) с началом в центре O_v центральной матрицы ОЭП.

При стандартных обозначениях, принятых в оптических телескопах [5], на рис. 1 представлена схема Ричи-Кретьена, дополненная КДИ в виде плоского диагонального зеркала, которое расположено в сходящемся пучке лучей вблизи ФП объектива. Основная идея встроенной в телескоп системы стабилизации СДИ на поверхности ОЭП с ВЗН приведена на рис. 2. Здесь в объективе 1 телескопа по схеме Ричи-Кретьена дополнительно имеются:

- КДИ 2 в виде плоского качающегося диагонального зеркала;
- датчик офсетного гидирования (ДОГ) 3 по скорости движения изображения в центре фокальной плоскости (отмечено красным цветом), который реализуется с помощью цифровой обработки сигналов от четырех эталонных ОЭП с ВЗН (помечено синим цветом), которые закреплены в четырех углах единой матрицы ОЭП с ВЗН в ФП телескопа;
- преобразователь 4 цифровых сигналов, поступающих на привод 5;
- привод 5, обеспечивающий угловые перемещения КДИ 2.

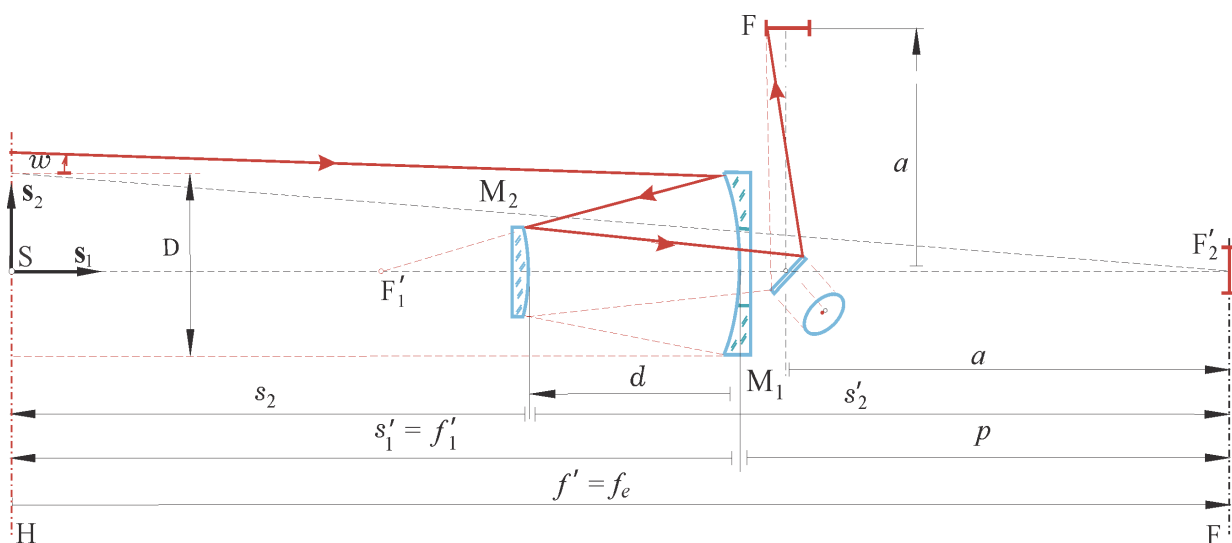


Рис. 1. Оптическая схема телескопа с компенсатором движения изображения

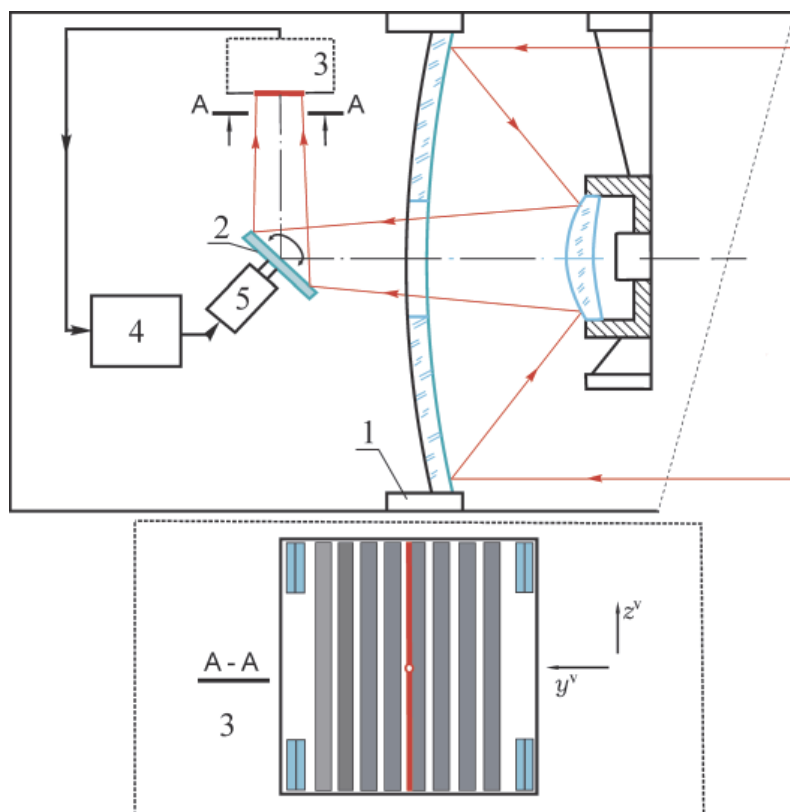


Рис. 2. Схема системы стабилизации СДИ в фокальной плоскости телескопа

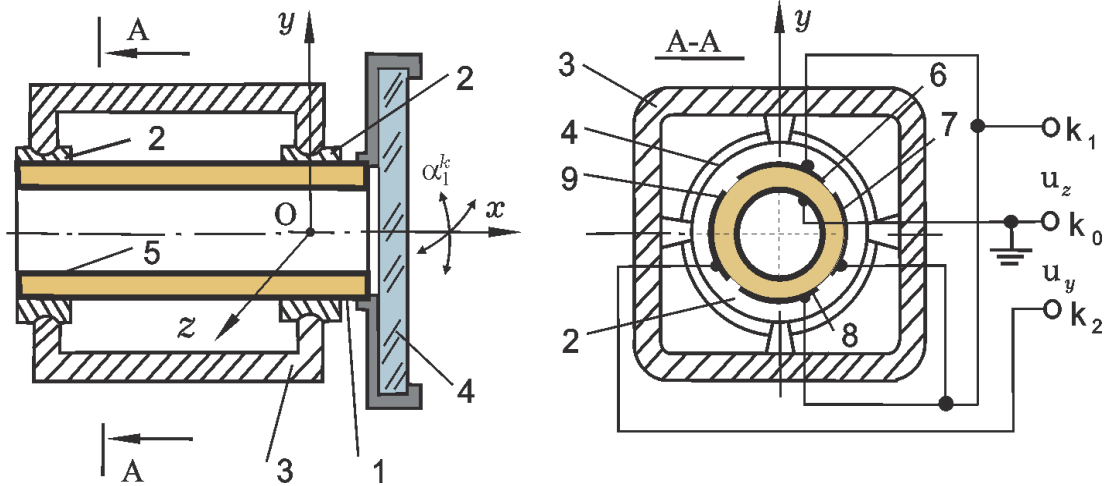


Рис. 3. Схема пьезокерамического привода КДИ

На рис. 3 представлена схема разработанного пьезокерамического привода КДИ [6], который имеет трубчатую конструкцию с возможностью изгиба в двух ортогональных плоскостях и содержит пьезокерамический элемент (ПКЭ) (1), эластичные прокладки (2), корпус (3) и КДИ (4) – плоское зеркало.

С помощью прокладок (2) ПКЭ свободно закреплен по краям к корпусу (3) в двух ортогональных плоскостях. КДИ (4) жестко закреплен на конце ПКЭ (1) так, что его отражающая плоскость ортогональна оси ПКЭ. Трубчатый ПКЭ имеет пять электродов: общий электрод (5) на его внутренней поверхности и 4 внешних электродов (6) – (9), расположенных вдоль ПКЭ так, что плоскости симметрии противоположных электродов являются ортогональными.

Продольные части ПКЭ имеют противоположные направления *радиальной* поляризации под противоположными электродами. При подаче управляющего напряжения на клеммы $k_1 \wedge k_0$ (или клеммы $k_2 \wedge k_0$) участки ПКЭ под электродами $6 \wedge 8$ (соответственно под электродами $7 \wedge 9$) за счет *обратного* поперечного пьезо-эффекта деформируются в противоположных направлениях и поэтому ПКЭ изгибается только в соответствующих плоскостях. Следовательно, трубчатый ПКЭ на рис. 3 является эквивалентом управляемого шарнира Гука с двумя степенями свободы.

В процессе работы описанной системы обеспечивается прецизионная стабилизация продольной и поперечной скоростей движения оптического изображения в центре фокальной плоскости с автоматической компенсацией *нестабильности* частоты передачи накапливаемых зарядов вдоль столбцов *информационных* ОЭП, которые отмечены серым цветом на рис. 2.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Задачи статьи состоят в синтезе основных алгоритмов обработки сигналов для офсетного

гидирования по скорости изображения в центре ФП телескопа, в анализе особенностей модели пьезокерамического привода для перемещений КДИ, в описании алгоритмов цифрового управления этим приводом, а также в представлении численных результатов для оценки эффективности системы прецизионной стабилизации СДИ в центре ФП телескопа.

АЛГОРИТМЫ ДОГ

Пусть векторы ω_e^s и v_e^s представляют в ТСК угловую скорость и скорость движения центра масс КА относительно ГСК, матрица $\tilde{C} = [\tilde{c}_j^i]$ определяет ориентацию ТСК относительно ГСК, а скалярная функция $D(t)$ является дальностью наблюдения по линии визирования. Тогда для любой точки в ФП телескопа продольная $\tilde{V}_y^i = \tilde{V}_y^i(\tilde{y}^i, \tilde{z}^i)$ и поперечная $\tilde{V}_z^i = \tilde{V}_z^i(\tilde{y}^i, \tilde{z}^i)$ составляющие вектора-столбца $\tilde{V}^i = \{\tilde{V}_y^i, \tilde{V}_z^i\}$ нормированной СДИ вычисляются по соотношению [7]

$$\tilde{V}^i = \begin{bmatrix} \tilde{y}^i & 1 & 0 \\ \tilde{z}^i & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q^i \tilde{v}_{e1}^s - \tilde{y}^i \omega_{e3}^s + \tilde{z}^i \omega_{e2}^s \\ q^i \tilde{v}_{e2}^s - \omega_{e3}^s - \tilde{z}^i \omega_{e1}^s \\ q^i \tilde{v}_{e3}^s + \omega_{e2}^s + \tilde{y}^i \omega_{e1}^s \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь $\tilde{y}^i = y^i / f_e$ и $\tilde{z}^i = z^i / f_e$ являются нормированными фокальными координатами указанной точки, где f_e – эквивалентное фокусное расстояние телескопа (см. рис. 1), скалярная функция $q^i = 1 - (\tilde{c}_2 \tilde{y}^i + \tilde{c}_3 \tilde{z}^i) / \tilde{c}_1$ и компоненты вектора $\tilde{v}_{ei}^s(t) = \{v_{ei}^s(t) \ i = 1, 2, 3 \equiv 1 \div 3\}$ нормированной скорости движения центра масс спутника вычисляются по соотношению $\tilde{V}_{ei}^s = v_{ei}^s(t) / D(t)$.

Принципиальная возможность определения вектора \tilde{V}^i нормированной СДИ и углового перемещения КА землеобзора непосредственно по космическим снимкам наземных объектов,

получаемых в реальном времени при сканирующей оптико-электронной съемке, возникает при наличии не менее двух линеек ОЭП, близко расположенных в ФП телескопа с обязательным перекрытием в направлении продольной СДИ. Авторская методика решения такой задачи кратко представлена в [8]. Четыре эталонные матрицы содержат по две линейки ОЭП, см. рис. 2, что позволяет в каждой из них в реальном времени определять набор значений векторов нормированной СДИ и по методу наименьших квадратов вычислить значения векторов нормированных СДИ $\tilde{V}_p^i = \{\tilde{V}_p^i, \tilde{V}_p^i\}$ для четырех точек $(\tilde{y}_p^i, \tilde{z}_p^i)$, $p = 1 \div 4$ – центров четырех матриц эталонных ОЭП. Отметим, что здесь рационально выполнять параллельные вычисления на индивидуальном микропроцессоре для каждой эталонной матрицы ОЭП. Соотношение (1) представляется в виде $\{\tilde{V}_y^i, \tilde{V}_z^i\} = \tilde{Q}^i + P^i \{\omega_{ei}^s\}$, где

$$\tilde{Q}^i(\tilde{y}^i, \tilde{z}^i) = q^i \begin{bmatrix} \tilde{v}_{e1}^s \tilde{y}^i + \tilde{v}_{e2}^s \\ \tilde{v}_{e1}^s \tilde{z}^i + \tilde{v}_{e3}^s \end{bmatrix};$$

$$P^i(\tilde{y}^i, \tilde{z}^i) = \begin{bmatrix} -\tilde{z}^i & \tilde{y}^i \tilde{z}^i & -(1 + (\tilde{y}^i)^2) \\ \tilde{y}^i & 1 + (\tilde{z}^i)^2 & -\tilde{y}^i \tilde{z}^i \end{bmatrix}.$$

На основе такого представления (1) для центров четырех матриц эталонных ОЭП с нормированными координатами $(\tilde{y}_p^i, \tilde{z}_p^i)$ получается соотношение $Q_p^i = P_p^i \omega_e^p$, где векторы $\omega_e^p = \{\omega_{ei}^p\}$, $Q_p^i = \tilde{V}_p^i - \tilde{Q}^i(\tilde{y}_p^i, \tilde{z}_p^i)$ и матрица $P_p^i = P^i(\tilde{y}_p^i, \tilde{z}_p^i)$. В совокупности для центров всех четырех матриц эталонных ОЭП получается матричное соотношение $Q_\Sigma^i = P_\Sigma^i \omega_e^p$, где столбец $Q_\Sigma^i = \{Q_p^i\}$ и прямоугольная матрица $P_\Sigma^i = \{P_p^i\}$.

Оценка $\hat{\omega}_e^s$ вектора угловой скорости КА непосредственно по космическим изображениям наземных объектов вычисляется по методу наименьших квадратов как $\hat{\omega}_e^s = (P_\Sigma^i)^\# Q_\Sigma^i$, где $(P_\Sigma^i)^\#$ – псевдообратная матрица в отношении матрицы

P_Σ^i . Оценка $\hat{\omega}_e^s$ используется для вычисления вектора $\tilde{V}_0^{im} = \{\tilde{V}_{y0}^{im}, \tilde{V}_{z0}^{im}\}$ в виде $\tilde{V}_0^{im} = \{q^i \tilde{v}_{e2}^s - \hat{\omega}_{e3}^s, q^i \tilde{v}_{e3}^s + \hat{\omega}_{e2}^s\}$. (2)

СДИ в центре $(\tilde{y}_0^i = 0, \tilde{z}_0^i = 0)$ матрицы информационных ОЭП (см. красную линию в фокальной плоскости телескопа и её центр на рис. 2) на основе анализа космических изображений наземных объектов, поступающих в реальном времени. Вектор \tilde{V}_0^{im} (2), сформированный по кратко представленному здесь алгоритму, представляет выходной сигнал ДОГ – вектор измеренной СДИ в центре ФП при фиксированном номинальном угловом положении КДИ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСА ПЬЕЗОПРИВОДА

Основная проблема моделирования и исследования динамики пьезопривода связана с гистерезисом пьезокерамики, применяемой в его конструкции при совмещении свойств упругого подвеса КДИ и собственно электромеханического движителя. Фундаментальная проблема нелинейного анализа систем с гистерезисом исследовалась многими авторами [9]. Математическая модель пьезокерамического привода разработана в [10], где физический гистерезис описывается дифференциальным включением с разрывной правой частью. Такая единая модель имеет 6 параметров и позволяет адекватно представлять широкий класс гистерезисных характеристик. В качестве примера на рис. 4 в нормированном виде приведены два вида характеристик физического гистерезиса единой математической модели, где отличаются только три параметра. Нормированная статическая гистерезисная характеристика пьезокерамического привода КДИ в меридиональной плоскости телескопа (рис. 3, управляющее напряжение u_z) представлена на рис. 5.

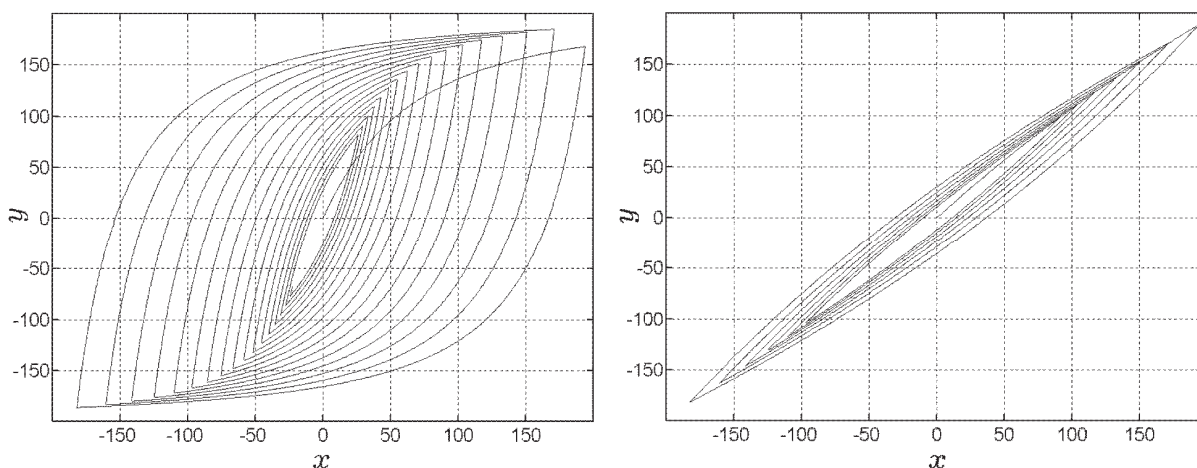


Рис. 4. Два вида характеристик физического гистерезиса единой математической модели

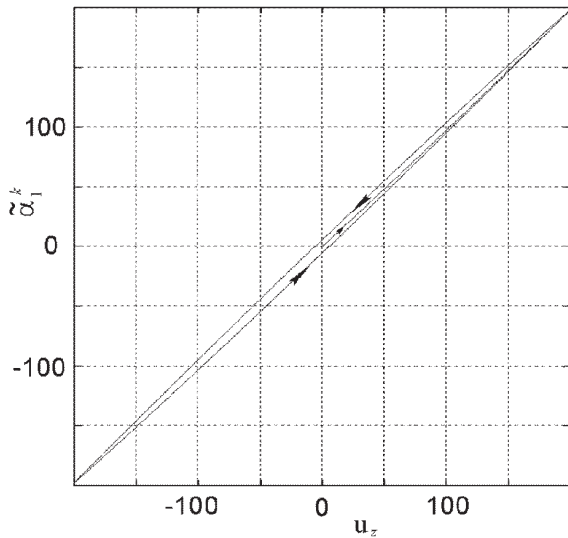


Рис. 5. Статическая характеристика пьезокерамического привода

На рис. 6 приведены нормированные логарифмические амплитудные характеристики двух моделей пьезопривода – линейная модель (a) и нелинейная модель (b) с идентификацией всех шести параметров гистерезисной характеристики, а также логарифмическая амплитудная характеристика (c), построенная на основе экспериментальных данных. Анализ представленных результатов подтверждает приемлемую адекватность разработанной нелинейной модели пьезокерамического привода КДИ с резонансной частотой 63.7 Гц. Как следует из рис. 6, собственные колебательные свойства пьезопривода КДИ практически не проявляются вплоть до частоты 37 Гц.

ДИСКРЕТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ И ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Пусть вектор $\tilde{V}_*^i = \{\tilde{V}_{y_*}^i, \tilde{V}_{z_*}^i\} = \{\tilde{V}_{y_*}^i, 0\}$ является вектором заданной нормированной СДИ в центре ФП телескопа, а вектор $\tilde{V}_o^i = \{\tilde{V}_{y_o}^i, \tilde{V}_{z_o}^i\}$ представляет фактическую скорость движения изображения в этой же точке ФП. При фиксированном номинальном угловом положении КДИ вектор $\Delta\tilde{V}^i$ погрешности стабилизации СДИ в центре ($\tilde{y}_o^i = 0, \tilde{z}_o^i = 0$) матрицы информационных ОЭП (см. красную линию на рис. 2) формируется по соотношению $\Delta\tilde{V}^i = \tilde{V}_o^i - \tilde{V}_*^i = \{\Delta\tilde{V}_y^i, \Delta\tilde{V}_z^i\} = \{\Delta\tilde{V}_y^i, \tilde{V}_z^i\}$, где $\Delta\tilde{V}_y^i = \tilde{V}_{y_o}^i - \tilde{V}_{y_*}^i$ и $\tilde{V}_z^i = \tilde{V}_{z_o}^i$. Если же угловое положение КДИ изменяется с помощью его пьезокерамического привода, то вектор $\delta\Delta\tilde{V}^i = \{\delta\Delta\tilde{V}_y^i, \delta\tilde{V}_z^i\}$ погрешности стабилизации СДИ в центре ФП формируется с учетом таких подвижек КДИ и коэффициентов оптической редукции. При этом алгоритмы ДОГ и вектор заданной нормированной СДИ \tilde{V}_*^i позволяют

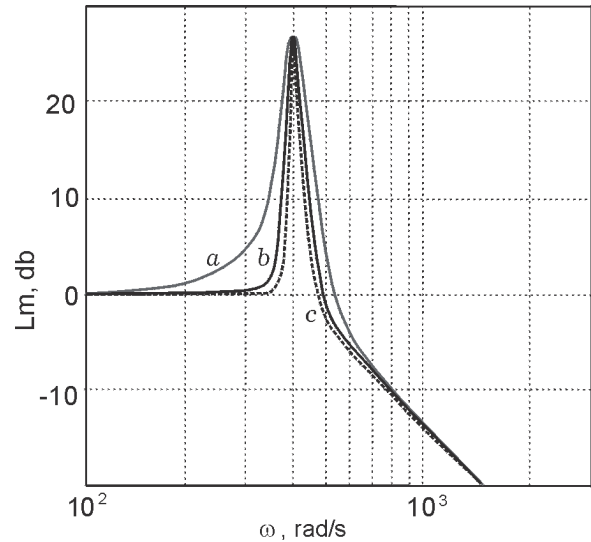


Рис. 6. Логарифмические амплитудные характеристики моделей пьезопривода

вычислить вектор $\delta\tilde{V}_o^{im}$ погрешности (рассогласования) СДИ в центре ФП с учетом работы встроенной в телескоп системы стабилизации СДИ. Нетрудно убедиться, что данная система является замкнутой – измеренное рассогласование СДИ поступает на пьезопривод КДИ, изменение положения которого приводит к устранению указанного рассогласования *одновременно* как в ДОГ на основе цифровой обработки сигналов эталонных матриц ОЭП, так и на информационных матрицах ОЭП.

В контуре системы стабилизации СДИ используются дискретная рекуррентная фильтрация векторного рассогласования $\delta\tilde{V}_o^{im}$ с частотой 32 Гц и рекуррентный цифровой закон управления пьезоприводом КДИ с частотой 16 Гц, который с учетом временного запаздывания [11] обеспечивает астатизм первого порядка и ширину полосы пропускания контура 5.7 Гц.

На рис. 7 представлены графики погрешности компонентов вектора *нормированной* СДИ в центре ФП без включения (синий цвет) и при включении (красный цвет) системы стабилизации СДИ с применением таких обозначений: \tilde{V}_z^i – *поперечная* СДИ; $\delta\tilde{V}_z^i$ – погрешность стабилизации *поперечной* СДИ при включении встроенной системы; $\Delta\tilde{V}_y^i$ – рассогласование *продольной* СДИ; $\delta\Delta\tilde{V}_y^i$ – погрешность стабилизации рассогласования в нормированной *продольной* СДИ при включении встроенной системы.

Нормированные продольная и поперечная СДИ вычисляются по формулам $\tilde{V}_y^i = V_y^i / f_e$ и $\tilde{V}_z^i = V_z^i / f_e$, где f_e – эквивалентное фокусное расстояние телескопа [м], а V_y^i и V_z^i – натуральные линейные продольная и поперечная СДИ с размерностью [м/с]. Поэтому нормированные

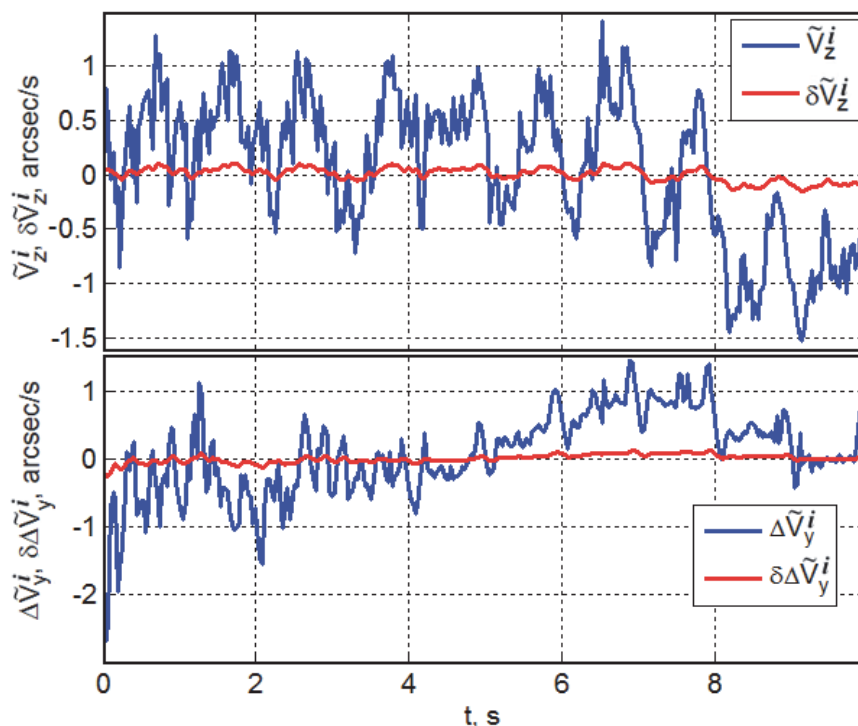


Рис. 7. Графики погрешностей стабилизации компонентов вектора СДИ без включения (синий цвет) и при включении (красный цвет) встроенной системы

СДИ в центре ФП на рис. 7 имеют размерность угловой скорости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научные и научно-технические проблемы углового наведения, высокоточного определения углового положения и управления ориентацией маневрирующих спутников землеобзора общеизвестны, требования по точности стабилизации движения таких КА при сканирующей оптико-электронной съемке весьма сложно выполнить традиционными способами.

В статье предложен нониусный способ прецизионной стабилизации скорости движения оптического изображения в ФП орбитального телескопа: I каскад – стабилизация углового движения корпуса телескопа, II каскад – стабилизация скорости движения изображения с помощью специальной оптико-механической системы, встроенной в телескоп.

Выполнен синтез основных алгоритмов обработки сигналов для офсетного гидирования по скорости изображения в центре ФП телескопа, рассмотрены особенности моделирования и исследования статических и динамических характеристик пьезокерамического привода для перемещений КДИ и кратко указаны разработанные алгоритмы цифрового управления с учетом временного запаздывания. Представлены численные результаты, которые подтверждают эффективность предлагаемой системы прецизионной стабилизации СДИ в центре ФП орбитального телескопа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Somov Ye., Butyrin S., Somov S. Guidance and robust gyromoment attitude control of agile observation satellite // Proceedings of 18th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. Nara. 2010. P.218-223.
2. Сомов Е.И., Дулькин Л.З. Астрономический телескоп с прецизионной стабилизацией положения изображения. Авторское свидетельство СССР № 558595. 1975.
3. Siguerdidjane H., Somov Ye. Nonius guidance and robust image motion stabilization of a large space astronomical telescope // Proceedings of 18th IFAC World Congress. Milan. 2011. P. 5142-5147.
4. Сомов Е.И., Бутырин С.А. Техническое зрение в системе нониусной стабилизации изображения космического астрономического телескопа // Техническое зрение. 2013. № 1. С. 5-14.
5. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука. 1976.
6. Сомов Е.И. Устройство для отклонения луча. Авторское свидетельство СССР № 543301. 1974.
7. Оптимизация режимов сканирующей оптико-электронной съемки и 3D-анимация движения маневрирующего спутника землеобзора / Е.И. Сомов, С.А. Бутырин, Т.Е. Сомова, С.Е. Сомов // Техническое зрение. 2013. № 1. С. 15-22.
8. Сомов Е.И., Бутырин С.А. Комплексование наблюдательной и навигационной информации для верификации работы системы управления спутника и улучшения измерительных свойств космических снимков // Механика, управление, информатика. 2012. № 8. С. 138-142.
9. Красносельский М.А., Покровский А.В. Системы с гистерезисом. М.: Наука. 1983.
10. Somov Ye. Model of physical hysteresis and control

of the image motion oscillations at a large space telescope // Proceedings of 2nd International Conference on Control of Oscillations and Chaos. Saint Petersburg. 2000. Vol. 1. P. 70-75.

11. Сомов Е.И. Робастная стабилизация упругих космических аппаратов при неполном дискретном измерении и запаздывании в управлении // Известия РАН. Теория и системы управления. 2001. № 2. С. 124–143.

PRECISE STABILIZATION OF AN IMAGE MOTION VELOCITY IN A LAND-SURVEY ORBITAL TELESCOPE

© 2016 Ye.I. Somov, S.A. Butyrin

Samara Scientific Center, Russian Academy of Sciences

We have considered an image motion velocity stabilization system embedded in an orbital land-survey telescope applied for a scanning optoelectronic observation of terrestrial objects. We carried out synthesis of algorithms for filtering a signal information and shortly described the digital control laws of piezoceramic driver taking into account a time delay. We have presented results on the efficiency of the embedded image motion velocity stabilization system.

Keywords: a space land-survey, an image motion velocity, stabilization.

*Yevgeny Somov, Candidate of Technics, Associate Professor,
Leading Research Fellow at the Dynamics and Motion Control
Department. E-mail e_somov@mail.ru
Sergey Butyrin, Candidate of Technics, Senior Research Fellow
at the Dynamics and Motion Control Department.
E-mail butyrinsa@mail.ru*