

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-1-30-39

## Методы оценки точности систем гироскопической стабилизации видеочамеры на подвижном объекте

В.В. Матвеев, И.А. Бехлер, Е.И. Понитков, М.Г. Погорелов

Тульский государственный университет,  
пр. Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия

Поступила 16.01.2024

Принята к печати 04.03.2024

Для повышения качества визуальной информации, поступающей с видеочамер, их устанавливают на платформы систем гироскопической стабилизации, обеспечивающие требуемую ориентацию оптической оси. Целью работы являлась разработка математического описания, позволяющего оценить точность систем гироскопической стабилизации видеочамеры на подвижном объекте, построенной на микромеханических датчиках первичной информации. Рассмотрена двухосная система гироскопической стабилизации видеочамеры на подвижном объекте. Дано математическое описание одного из каналов системы стабилизации с управлением по углу и угловой скорости. Измерение угла отклонения платформы от плоскости горизонта и её угловой скорости обеспечено микромеханическими акселерометрами и гироскопами соответственно. Пояснена физическая природа возникновения синхронных погрешностей системы стабилизации при угловых колебаниях подвижного объекта. Дана оценка синхронной погрешности системы стабилизации при колебаниях объекта с частотой 30 Гц. Приведено аналитическое соотношение для оценки погрешностей системы стабилизации, вызванных случайными погрешностями гироскопов и акселерометров. Показано, что если стабилизация платформы осуществляется только по сигналам гироскопов, содержащих в измерениях случайные погрешности типа белого шума, то это приведёт к дрейфу платформы со средним квадратическим отклонением, пропорциональным корню квадратному из времени. При этом постоянный возмущающий момент не обрабатывается. Приведено математическое описание «смаза» изображения видеочамеры при колебаниях платформы, вызванных случайными погрешностями инерциальных датчиков. Проиллюстрирован эффект смаза изображения при различных параметрах колебаний платформы.

**Ключевые слова:** система стабилизации, видеочамера, гироскоп, акселерометр, смаз изображения

---

**Адрес для переписки:**

Матвеев В.В.

Тульский государственный университет,  
пр-т Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия  
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

---

**Address for correspondence:**

Matveev V.V.

Tula State University,  
Lenina Ave., 92, Tula 300012, Russia  
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

---

**Для цитирования:**

В.В. Матвеев, И.А. Бехлер, Е.И. Понитков, М.Г. Погорелов.

Методы оценки точности систем гироскопической стабилизации видеочамеры на подвижном объекте.

Приборы и методы измерений.

2024. Т. 15. № 1. С. 30–39.

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-1-30-39

---

**For citation:**

Matveev VV, Behler IA, Ponitkov EI, Pogorelov MG.

Methods for Assessing the Accuracy of Video Camera Gyroscopic Stabilization Systems on a Moving Object.

Devices and Methods of Measurements.

2024;15(1):30–39. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-1-30-39

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-1-30-39

# Methods for Assessing the Accuracy of Video Camera Gyroscopic Stabilization Systems on a Moving Object

V.V. Matveev, I.A. Behler, E.I. Ponitkov, M.G. Pogorelov

Tula State University,  
Lenina Ave., 92, Tula 300012, Russia

Received 16.01.2024

Accepted for publication 04.03.2024

## Abstract

Video camera, are installed on platforms of gyroscopic stabilization systems in order to improve the quality of visual information and provide the required orientation of the optical axis. The goal of the work was to develop a mathematical description that allows evaluating accuracy of gyroscopic stabilization systems for a video camera on a moving object, built on micromechanical sensors for primary information. A biaxial system for gyroscopic stabilization of a video camera on a moving object is considered. A mathematical description of the channel of the stabilization system with control over angle and angular velocity is given. Measuring the angle of deviation of the platform from the horizontal plane and its angular velocity is provided by micromechanical accelerometers and gyroscopes, respectively. Physical nature of the synchronous errors' occurrence in the stabilization system during angular vibrations of a moving object is explained. An assessment of the synchronous error of the stabilization system when the object oscillates with a frequency of 30 Hz is given. An analytical relationship is presented for estimating of the stabilization system errors is caused by random errors of gyroscopes and accelerometers. It is shown that if the platform is stabilized only by gyroscope signals containing random errors such as white noise in the measurements, this will lead to the platform drifting with a standard deviation proportional to the square root of time. In this case, the constant disturbing moment is not processed. A mathematical description of the “blurring” of the video camera image during platform vibrations caused by random errors in inertial sensors is given. Effect of image blur for various platform oscillation parameters is illustrated.

**Keywords:** stabilization system, video camera, gyroscope, accelerometer, image blur

---

### Адрес для переписки:

Матвеев В.В.  
Тульский государственный университет,  
пр-т Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия  
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

### Address for correspondence:

Matveev V.V.  
Tula State University,  
Lenina Ave., 92, Tula 300012, Russia  
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

---

### Для цитирования:

В.В. Матвеев, И.А. Бехлер, Е.И. Понитков, М.Г. Погорелов.  
Методы оценки точности систем гироскопической стабилизации видеокамеры на подвижном объекте. Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15. № 1. С. 30–39.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-1-30-39

### For citation:

Matveev VV, Behler IA, Ponitkov EI, Pogorelov MG.  
Methods for Assessing the Accuracy of Video Camera Gyroscopic Stabilization Systems on a Moving Object. *Devices and Methods of Measurements*. 2024;15(1):30–39. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-1-30-39

## Введение

Для повышения качества визуальной информации, поступающей с видеокамер, их устанавливают на платформы систем гироскопической стабилизации (СГС), обеспечивающих требуемую ориентацию оптической оси. Наиболее полную стабилизацию видеокамеры выполняют трёхосные СГС, исключая влияние произвольного углового движения объекта. Несмотря на то, что двухосные СГС обеспечивают стабилизацию видеокамеры вокруг двух осей, они довольно часто применяются на подвижных объектах, так как просты в конструктивном исполнении и обладают меньшими массо-габаритными характеристиками по сравнению с трёхосными СГС. В качестве датчиков первичной информации СГС среднего и низкого класса точности применяются микромеханические гироскопы (ММГ) и микромеханические акселерометры (ММА), задачей которых является измерение параметров, характеризующих отклонение платформы от заданного положения. Микромеханические гироскопы СГС предназначены для получения сигналов, пропорциональных угловой скорости платформы. ММА в составе СГС при движении объекта без ускорений функционируют в качестве измерителей угловых отклонений платформы от плоскости горизонта.

В настоящее время по теории СГС известна обширная литература [1–11]. В работах [1–3] приводится математическая модель гиросtabilизатора, записанная в проекциях абсолютной угловой скорости платформы на связанные с ней оси. Такая математическая модель является довольно продуктивной и получила развитие для анализа и синтеза гиросtabilизаторов на различных гироскопических датчиках: динамически настраиваемых гироскопах [4], волоконно-оптических гироскопах [5, 8], на ММГ [7, 11], на механических гироскопах [1, 2], на волновых твердотельных гироскопах [10]. В подавляющем числе источников литературы отсутствует оценка влияния инструментальных погрешностей гироскопических датчиков на точность стабилизации или погрешности автосопровождения объектов.

Целью работы являлась разработка математического описания, позволяющего оценить точность систем гироскопической стабилизации видеокамеры на подвижном объекте, построенной на микромеханических датчиках первичной информации.

## Электрокинематическая схема двухосной системы стабилизации

Электрокинематическая схема построения двухосной СГС видеокамеры по углам тангажа и крена приведена на рисунке 1. Платформа с установленной на ней видеокамерой имеет две степени свободы относительно подвижного объекта: вращение вместе с рамой вокруг оси  $X$  и собственное вращение вокруг оси  $Z$ . На платформе установлен также инерциальный измерительный модуль (ИИМ), включающий в общем случае три ММГ и три ММА. ИИМ выявляют отклонение платформы от требуемого углового положения и формируют сигналы, поступающие в вычислительно-преобразующее устройство, формирующее управляющие сигналы на двигатели стабилизации.

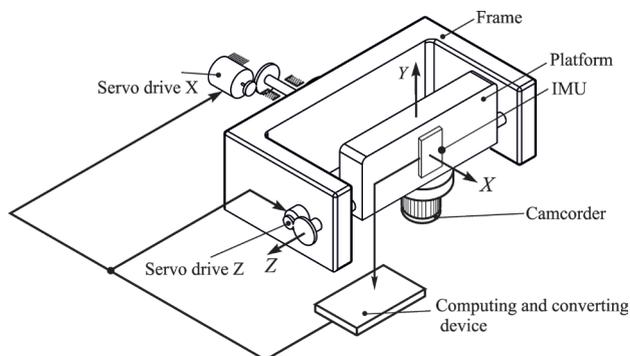


Рисунок 1 – Схема двухосной системы гироскопической стабилизации видеокамеры

Figure 1 – Diagram of a two-axis gyroscopic stabilization system for a video camera

Моменты, развиваемые двигателями стабилизации, возвращают платформу в исходное угловое положение. Чаще всего платформе придаётся неизменное положение относительно плоскости горизонта с точностью до погрешностей стабилизации.

## Динамическая модель системы гироскопической стабилизации

Динамические уравнения СГС обычно записываются в абсолютных угловых скоростях платформы [1–3], подобно быстровращающемуся ротору-волчку классического трёхстепенного гироскопа (рисунок 2).

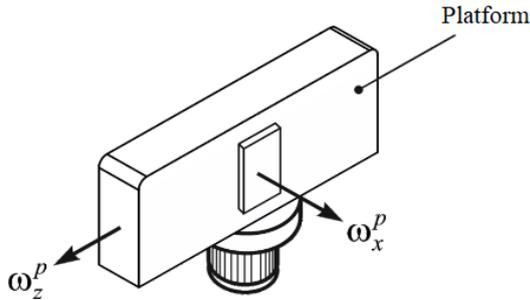


Рисунок 2 – Угловые скорости платформы

Figure 2 – Platform angular velocities

В идеальном случае угловые скорости платформы  $\omega_x^p$  и  $\omega_z^p$  при двухосной стабилизации должны быть всегда равны нулю при произвольных эволюциях подвижного объекта. При отличных от нуля угловых скоростях  $\omega_x^p$  и  $\omega_z^p$  их интегрирование по времени характеризует угловые погрешности стабилизации:

$$\varepsilon_x = \int_0^t \omega_x^p dt, \quad \varepsilon_z = \int_0^t \omega_z^p dt.$$

Рассмотрим динамику платформы СГС по каналу крена. В этом случае математическую модель СГС можно описать системой уравнений вида [11]:

$$J\dot{\omega}_x^p + b\dot{\alpha} = M_{дв} -k_\alpha \alpha - M_0 \text{sign}(\dot{\alpha}); \quad (1)$$

$$\dot{\alpha} = \omega_x^p - \omega_x; \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_x = \omega_x^p; \quad (3)$$

$$T_{дв} \dot{M}_{дв} + M_{дв} u_y; \quad (4)$$

$$T_y \dot{u}_y + u_y = U(\omega_x^p, \varepsilon_x, \alpha, \dots), \quad (5)$$

где  $J$  – приведённый к оси вращения  $X$  момент инерции СГС;  $b$  – коэффициент вязкого трения;  $M_{дв}$  – момент, развиваемый двигателем стабилизации;  $k_\alpha$  – коэффициент тяжения токоподводов;  $\alpha$  – угол поворота рамы относительно подвижного объекта (корпуса

СГС);  $M_0$  – амплитуда момента сил сухого трения в оси стабилизации  $X$ ;  $\omega_x$  – угловая скорость крена подвижного объекта;  $\varepsilon_x$  – погрешность стабилизации,  $T_{дв}$ ;  $k_{дв}$  – постоянная времени и коэффициент передачи по моменту двигателя стабилизации соответственно;  $u$  – напряжение, подводимое к двигателю стабилизации;  $U(\omega_x^p, \varepsilon_x, \alpha, \dots)$  – функция, реализующая закон управления платформой;  $T_y, u_y$  – постоянная времени и выходное напряжение усилителя.

Уравнение (1) характеризует равновесие моментов, действующих по оси стабилизации платформы  $X$ , в котором демпфирующий момент  $b\dot{\alpha}$ , момент сил сухого трения  $M_0 \text{sign}(\dot{\alpha})$  и момент тяжения токоподводов зависят от взаимного движения рамы и объекта на угол  $\alpha$  с угловой скоростью  $\dot{\alpha}$ . Кинематическое соотношение (2) характеризует взаимосвязь относительной угловой скорости рамы  $\dot{\alpha}$ , абсолютной угловой скорости платформы  $\omega_x^p$  и угловой скорости объекта  $\omega_x$ . Обычно в режиме стабилизации абсолютная угловая скорость платформы значительно меньше угловой скорости объекта  $\omega_x^p \ll \omega_x$ , поэтому для момента сил сухого трения сделаем следующее допущение [1]:

$$M_0 \text{sign}(\dot{\alpha}) = M_0 \text{sign}(\omega_x^p - \omega_x) \approx -M_0 \text{sign}(\omega_x). \quad (6)$$

В этом случае момент сил сухого трения при движении объекта рассматривается как возмущающий момент.

Уравнение (3) характеризует взаимосвязь погрешности стабилизации  $\varepsilon_x$  с абсолютной угловой скоростью платформы  $\omega_x^p$ . Уравнения (4), (5) характеризуют динамические модели двигателя стабилизации и усилителя.

На рисунке 3 приведена структурная схема одного канала СГС, полученная в соответствии с уравнениями (1)–(5), с учётом допущения (6). На входе СГС действуют возмущающие моменты, которые стремятся отклонить платформу от первоначального положения. В результате платформа вращается в пространстве с абсолютной угловой скоростью  $\omega_x^p$ , которая представляет собой угловую скорость дрейфа платформы, измеряемую ММГ:

$$U_r \approx k_\omega (\omega_x^p + v_r),$$

где  $U_r$  – выходной сигнал гироскопа;  $k_\omega$  – коэффициент передачи [В/(рад/с)];  $v_r$  – инструментальная погрешность гироскопа.

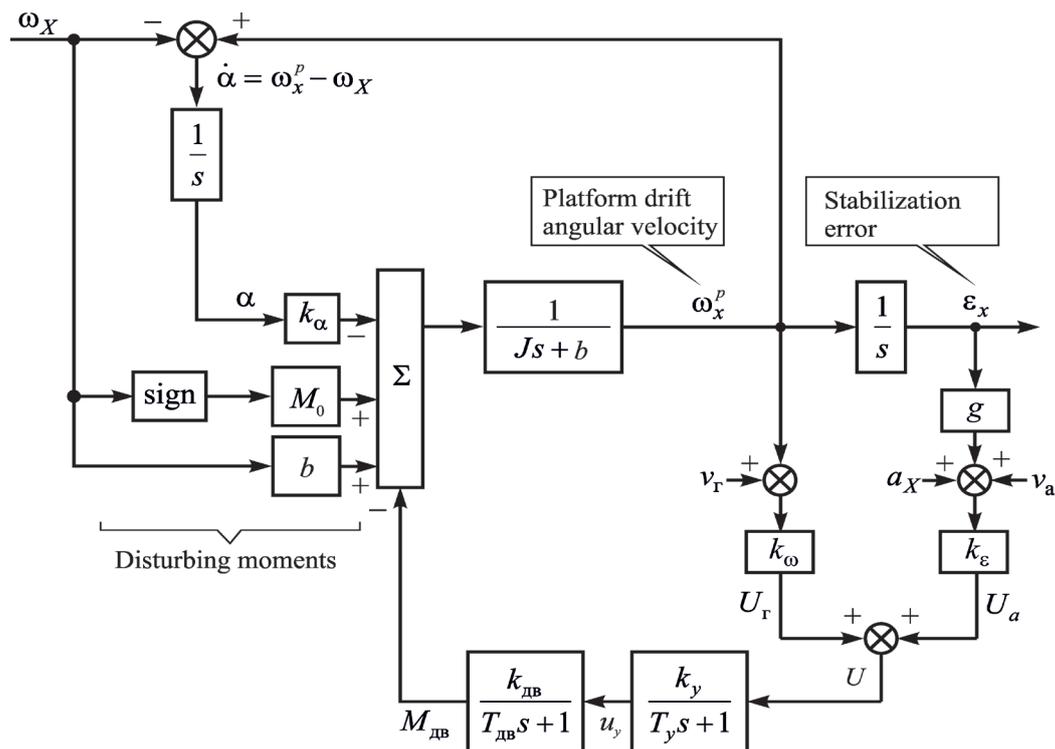


Рисунок 3 – Структурная схема системы гироскопической стабилизации по каналу крена

Figure 3 – Block diagram of the gyroscopic stabilization system along the roll channel

Выше было отмечено, что интеграл по времени от угловой скорости  $\omega_x^p$  определяет погрешность стабилизации платформы по углу  $\epsilon_x$ . При малом угле  $\epsilon_x$  выходной сигнал акселерометра определяется соотношением:

$$U_a \approx k_\epsilon (g\epsilon_x + a_x + v_a),$$

где  $U_a$  – выходной сигнал акселерометра;  $g$  – ускорение свободного падения;  $a_x$  – поступательное ускорение подвижного объекта;  $v_a$  – инструментальные погрешности акселерометра;  $k_\epsilon$  – коэффициент передачи [В/(м/с<sup>2</sup>)].

Сигнал управления по углу и угловой скорости  $U = U_r + U_a$  усиливается и подаётся на двигатель стабилизации. Последний развивает момент разгрузки  $M_{дв}$ , стремящийся компенсировать влияние возмущающих моментов.

### Влияние вибраций основания на точность стабилизации

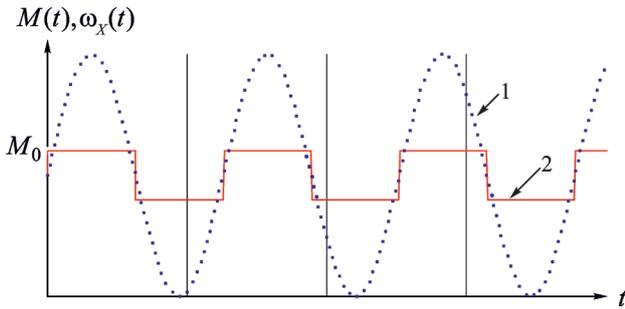
Под действием всевозможных периодических возмущений подвижный объект совершает угловые колебания вокруг своего центра масс, которые приводят к появлению так называемых синхронных погрешностей

СГС [11]. Возникновение синхронных погрешностей связано с тем, что в процессе колебаний (вибраций) объекта имеет место «захват» платформы моментами сил сухого и вязкого трения, в результате чего в определённые моменты времени платформа движется как единое целое с колеблющимся объектом. Если объект совершает колебания, к примеру, по углу крена с угловой скоростью  $\omega_X = A \sin(\omega_0 t)$ , где  $A$ ,  $\omega_0$  – амплитуда и круговая частота угловой скорости колебаний объекта соответственно, то из-за вязкого трения на платформу будет действовать гармонический возмущающий момент  $A b \sin(\omega_0 t)$ . Что касается момента сил сухого трения, то при описании его функцией  $\text{sign}(\ )$  гармонические колебания объекта приведут к возмущающему моменту в форме прямоугольной волны (рисунок 4).

При разложении прямоугольной волны  $M_0 \text{sign}(\sin \omega_0 t)$  в ряд Фурье получим сумму гармоник с амплитудами и частотами, приведёнными на рисунке 5.

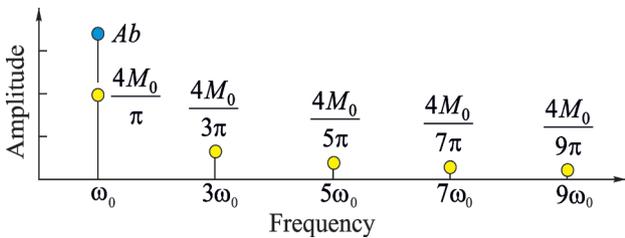
Из рисунка 5 следует, что действие сил сухого трения при колебаниях основания эквивалентно сумме гармоник с частотами, кратными частоте колебаний объекта с

коэффициентами 3, 5, 7, ... . На рисунке 5 приведена также единственная гармоника на частоте колебаний носителя  $\omega_0$ , вызванная моментом сил вязкого трения.



**Рисунок 4** – Угловая скорость объекта (1) и момент сил сухого трения (2)

**Figure 4** – Angular velocity of the object (1) and moment of dry friction forces (2)



**Рисунок 5** – Амплитудный спектр сил сухого и вязкого трения

**Figure 5** – Amplitude spectrum of dry and viscous friction forces

Для оценки влияния колебаний объекта рассмотрим передаточную функцию, характеризующую реакцию платформы СГС на суммарный возмущающий момент:

$$\Phi_B(s) = \frac{\varepsilon_x(s)}{M_B(s)} = \frac{(T_{дв}s+1)(T_y s+1)(Js+b)}{(Js+b)[s(T_{дв}s+1)(T_y s+1)(Js+b) + k_y k_{дв}(gk_\varepsilon + k_{\omega}s)]} \quad (7)$$

Если ограничиться только первой гармоникой разложения в ряд Фурье момента сил сухого трения, то синхронную погрешность системы стабилизации можно получить из передаточной функции (7) следующим образом:

$$\varepsilon_x = |\Phi_B(j\omega_0)| \left( \frac{4M_0}{\pi} + Ab \right) \quad (8)$$

Оценим синхронную погрешность СГС для следующих параметров:  $J = 0,001 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $k_{дв} = 4 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{В}$ ,  $k_T = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ В}/(\text{рад}/\text{с})$ ,

$k_\varepsilon = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ В}/(\text{м}/\text{с}^2)$ , коэффициент вязкого трения  $b = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ , модуль момента сил сухого трения  $M_0 = 0,01 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , постоянные времени усилителя и двигателя  $T_y = 10^{-3} \text{ с}$ ,  $T_{дв} = 10^{-2} \text{ с}$ . Пусть угловая скорость колебаний объекта происходят с амплитудой  $1,65 \text{ рад}/\text{с}$  и частотой  $30 \text{ Гц}$ . В этом случае в соответствии с (8) амплитуда синхронной погрешности составит  $0,03^\circ$ , которая может привести к смазу изображения при съёмке.

Отметим еще несколько особенностей СГС. При постоянном возмущающем моменте установившаяся погрешность стабилизации определяется соотношением:

$$\varepsilon_x^{уст}(t) = \frac{M_B}{k_{дв} k_y k_\varepsilon g}$$

Таким образом, точность стабилизации может быть повышена соответствующим выбором произведения  $k_{дв} k_y k_\varepsilon g$  с учётом обеспечения необходимых запасов устойчивости. Если бы стабилизация осуществлялась только по гироскопам ( $k_\varepsilon = 0$ ), то передаточная функция замкнутой системы имела бы вид:

$$\Phi_B(s) = \frac{\varepsilon_x(s)}{M_B(s)} = \frac{(T_{дв}s+1)(T_y s+1)(Js+b)}{s(Js+b)[(T_{дв}s+1)(T_y s+1)(Js+b) + k_y k_{дв} k_{\omega}]}, \quad (9)$$

из которого следует, что СГС не обрабатывает постоянный возмущающий момент в виду наличия в знаменателе передаточной функции (9) в качестве сомножителя оператора Лапласа  $s$ .

Для улучшения качества стабилизации СГС, построенной только на гироскопических датчиках угловой скорости в систему обычно вводят изодромное корректирующее устройство [2]:

$$W(s) = \frac{1+T_s}{T_s} = \frac{1}{T_s} + 1,$$

сочетающее пропорциональный и интегрирующий законы регулирования либо интегро-дифференцирующее звено:

$$W(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}, \quad (T_1 < T_2).$$

Наличие интегрирования в изодромном законе может привести к накоплению погрешностей по углу отклонения платформы,

что без специальных мер приведет к уходу платформы от первоначального положения. Кроме того, платформа не избирательна к какому-либо направлению или к плоскости горизонта.

### Влияние инструментальных погрешностей гироскопов и акселерометров

Пренебрежём постоянными времени усилителя и двигателя ( $T_y \approx 0$ ,  $T_{дв} \approx 0$ ). В этом случае передаточные функции, характеризующие реакцию платформы на инструментальные погрешности гироскопа и акселерометра, определяются следующим образом:

$$\Phi_r(s) = \frac{\varepsilon_x(s)}{v_r(s)} = -\frac{K_r}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}; \quad (10)$$

$$\Phi_a(s) = \frac{\varepsilon_x(s)}{v_a(s)} = -\frac{K_a}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}, \quad (11)$$

где  $K_r = k_\omega / (gk_\varepsilon)^{-1}$ ;  $K_a = g^{-1}$  – коэффициенты передачи;  $\xi = \frac{b}{2\sqrt{Jk_{дв}k_yk_\varepsilon g}}$  – относительный

коэффициент демпфирования;  $T = \sqrt{\frac{J}{k_{дв}k_yk_\varepsilon g}}$  – постоянная времени [с].

Представим инструментальные погрешности гироскопа и акселерометра моделями белого шума со спектральными плотностями  $S_r$  [рад<sup>2</sup>/с] и  $S_a$  [м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>]. Тогда результирующая погрешность системы стабилизации примет вид:

$$\sigma_\varepsilon^{a+r} = \sqrt{\frac{(k_\omega^2 S_r + k_\varepsilon^2 S_a) k_{дв} k_y}{2gk_\varepsilon (b + k_{дв} k_y k_\omega)}}. \quad (12)$$

Так как обычно вязкое трение в осях стабилизации не велико, то  $b \ll k_{дв} k_y k_\omega$  и соотношение (12) приобретает вид:

$$\sigma_\varepsilon^{a+r} \approx \sqrt{\frac{1}{2g} \left( \frac{S_r}{n} + n S_a \right)}, \quad (13)$$

где  $n = k_\varepsilon / k_\omega$  – отношение коэффициентов в каналах угла и угловой скорости [рад/(м/с)].

Оценим среднее квадратическое отклонение (СКО) погрешностей СГС для микромеханических гироскопов и акселерометров со спектральными плотностями шума:  $S_r = 0,05^2$  [градус<sup>2</sup>/с],  $S_a = 0,01^2$  [м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>] при  $n = 3$  [рад/(м/с)]. На основании зависимости (13) имеем  $\sigma_\varepsilon^{a+r} \approx 0,22^\circ$ .

Следует обратить внимание, что если бы платформа стабилизировалась только по сигналам гироскопов, то СКО погрешности стабилизации, вызванное белым шумом гироскопа, определялось бы соотношением:

$$\sigma_\varepsilon^r(t) \approx \sqrt{S_r t}.$$

Для шума ММГ из предыдущего расчётного примера при длительности функционирования 300 с будет накоплено СКО погрешности стабилизации  $\sigma_\varepsilon^r = 0,87^\circ$ .

Акселерометры, помимо положительного эффекта – придания избирательности платформы к плоскости горизонта, могут привести к погрешностям, обусловленным ускоренным движением объекта. При движении с ускорениями  $a_x$  акселерометры будут устремлять платформу к кажущейся вертикали, подобно физическому маятнику при ускоренном перемещении точки его подвеса. При длительном движении с ускорением установившаяся погрешность платформы определяется соотношением  $\varepsilon_x \approx a_x / g$  и может достигать значительных величин.

### Модель смаза изображения

Существует несколько факторов, которые могут вызвать смаз на изображении:

- движение изображения (сцены или камеры) во время его регистрации;
- некоторые объективы способны создавать эффект смаза из-за аберраций или других оптических особенностей;
- вибрациями камеры во время съёмки;
- сглаживание из-за сжатия данных;
- эффект «боке».

Особенно критичным является использование долгих выдержек, например в сумерках, в условиях, когда камера подвержена вибрациям, что негативно сказывается на качестве изображения.

Один из методов моделирования смазанного изображения  $G(u, v)$  базируется на искажающем операторе  $H(u, v)$  и осуществляется в частотной области [11]:

$$G(u, v) = F(u, v) H(u, v), \quad (14)$$

где  $u, v$  – координаты в частотной области, рад/пикс;  $F(u, v)$  – неискажённое изображение в частотной области.

Допустим, что смазывание возникает в процессе равномерного углового движения

камеры за время экспозиции  $\tau$  относительно оптической оси  $O$ , тогда оптическая ось  $O'$  изменится на угол  $\alpha$ . Абстрагируясь от радиальной дисторсии оптической системы камеры, рассмотрим модель камеры с точечной диафрагмой, или стенопа (рисунок 6).

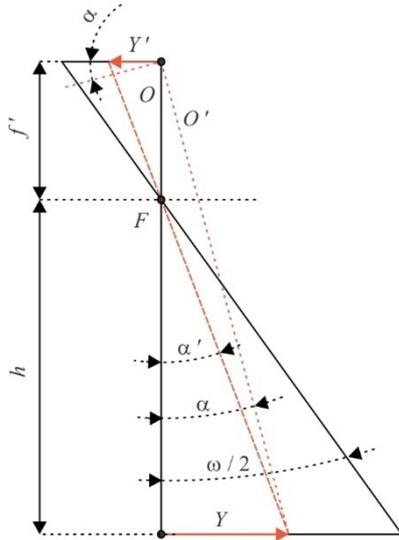


Рисунок 6 – Модель видеокамеры с точечной диафрагмой

Figure 6 – Model of a Pinhole Camera

В результате углового движения получим сдвиг в пространстве предметов на величину  $Y = \text{tg}\alpha(h+f')$ , где  $f'$  – фокусное расстояние объектива, м;  $h$  – высота объекта над поверхностью, м.

Так как  $h \gg f'$ , то  $Y = ht\text{g}\alpha$  при  $\alpha < \omega/2$ , где  $\omega$  – угловое поле зрения объектива камеры, град.

Спроецируем  $Y$  на матрицу фотоприёмного устройства, расположенного перпендикулярно оптической оси  $O$ . В результате получим проекцию сдвига  $Y'$ , которая выражает из следующего равенства:

$$\text{tg}\alpha' = \frac{Y}{h} = \frac{Y'}{f'}$$

Тогда  $Y' = f' \text{tg}\alpha$ .

Учитывая дискретность матрицы, получаем:

$Y' = aN$ , где  $a$  – размер пикселя, м;  $N$  – количество пикселей, приходящихся на проекцию сдвига  $Y'$ .

Предположим, что угловое движение тангажа и крена совершается на углы  $\vartheta$  и  $\gamma$  относительно оси  $Z$  и  $X$  платформы. Тогда величины сдвига пикселей  $L_x$  и  $L_y$  определяются как:

$$L_x = \frac{f'_x}{a_x} \text{tg}\vartheta \quad \text{при } \vartheta < \omega/2;$$

$$L_y = \frac{f'_y}{a_y} \text{tg}\gamma \quad \text{при } \gamma < \omega/2.$$

В результате характеристика движения камеры  $k(u, v)$  в частотной области определяться как:

$$k(u, v) = \frac{u L_x}{M} + \frac{v L_y}{N},$$

где  $M \times N$  – размер фильтра, пикс.

В таком случае передаточная функция искажения определяется так:

$$H(u, v) = \text{sinc}[k(u, v)] \exp[-j\pi k(u, v)].$$

Проведём компьютерное моделирование для оценки влияния углового движения камеры относительно оптической оси на углы  $\vartheta$  и  $\gamma$  на качество смазанного изображения. В качестве снимка используется спутниковая карта с разрешением  $M \times N = 448 \times 475$  пикс и пространственным разрешением  $K_x \times K_y = 5,51 \times 5,54$  м/пикс. Предположим, что фокусное расстояние камеры одинаково по осям  $x$  и  $y$ , как и размер пикселя, тогда  $f' = f'_x = f'_y = 4$  мм и  $a = a_x = a_y = 1,4$  мкм. Далее на изображение вводится смаз (рисунок 7) в соответствии с формулой (14).

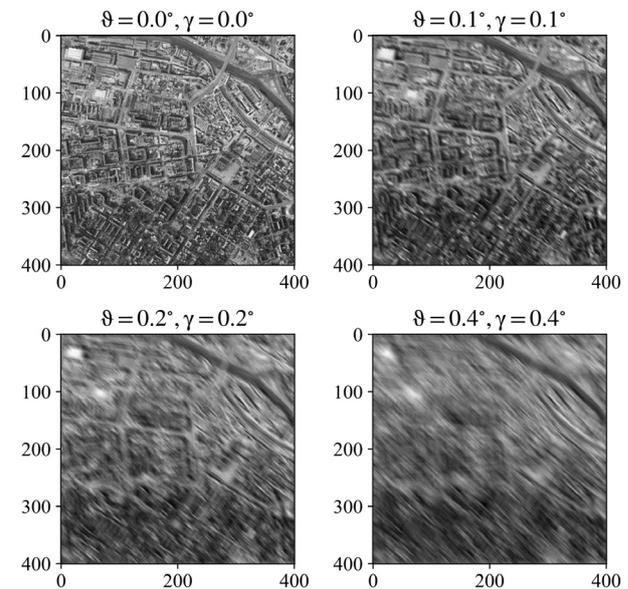
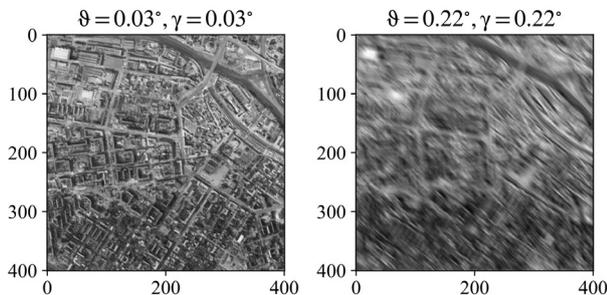


Рисунок 7 – Влияние углового движения относительно оптической оси на изображение

Figure 7 – Effect of angular motion relative to the optical axis on the image

Смоделируем влияние во время экспозиции изображения синхронной и инструментальной погрешности стабилизации на углы  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0,03^\circ$  и  $\sigma_\varepsilon^{a+\gamma} \approx 0,22^\circ$  на изображение (рисунок 8).



**Рисунок 8** – Влияние синхронной и инструментальной погрешности стабилизации на качество изображения

**Figure 8** – Effect of synchronous and instrumental stabilization error on image quality

Результаты проведённого моделирования свидетельствует, что качество изображения будет снижаться с увеличением углов крена и тангажа во время экспозиции. Таким образом, для повышения качества изображения необходимо уменьшать трение в подвесе СГС и снижать уровень шумов датчиков первичной информации.

## Заключение

Сформирована структура системы гироскопической стабилизации видеокамеры с управлением по углу и угловой скорости. Показано, что данный закон стабилизации может быть сформирован на основе сигналов микромеханических гироскопов и акселерометров. Установлено, что при реализации чисто гироскопической системы стабилизации случайные погрешности гироскопов вызовут дрейф платформы со средним квадратическим отклонением, пропорциональным квадратному корню из времени.

Показано, что привлечение сигналов акселерометров позволит устранить дрейф платформы и придать ей свойство избирательности к плоскости горизонта. Приведена аналитическая зависимость, позволяющая оценить погрешность системы стабилизации, вызванную шумами гироскопов и акселерометров. Рассмотрены физические основы

возникновения синхронных погрешностей, вызванных наличием сил вязкого и сухого трения в осях стабилизации, которые приводят к колебаниям платформы синхронно с колебанием объекта. Показано, что при описании синхронных погрешностей допустимо ограничиться первой гармоникой разложения в ряд Фурье функции от момента сил сухого трения. Дано аналитическое соотношение, позволяющее оценить синхронные погрешности системы стабилизации.

Предложено математическое описание «смаза» изображения, которое основано на фильтрации изображения в частотной области. Приведены искажения изображения видеокамеры, вызванные синхронными и случайными погрешностями системы стабилизации.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта правительства Тульской области в сфере науки и техники №ДС/117/ЛИДПИ/23/ТО от 27.09.23.

## Acknowledgments

The work was supported by a grant from the government of the Tula region in the field of science and technology No. DS/117/LIDPI/23/TO dated 09.27.23.

## Список использованных источников

1. Арсеньев В.Д. Расчет и синтез параметров гиросtabilizаторов для маневренных объектов. Ч. 1. Расчет возмущающих моментов в гиросtabilizаторах для маневренных объектов / В.Д. Арсеньев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 42 с.
2. Арсеньев В.Д. Расчет и синтез параметров гиросtabilizаторов для маневренных объектов Ч. 2: Анализ устойчивости и расчет погрешностей стабилизации гиросtabilizаторов. / В.Д. Арсеньев. – М.: Изд-во МГТУ. 2015. 35 с.
3. Малютин Д.М. Управляемый гиросtabilizатор повышенной точности на микромеханических чувствительных элементах / Д.М. Малютин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 6. С. 326–339.
4. Распопов В.Я. Измерительные приборы и системы для ориентации, стабилизации и управления / В.Я. Распопов, Д.М. Малютин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 4. С. 372–386.
5. Дзюба А.Н. Моделирование погрешностей гиросtabilizатора гравиметра на волоконно-опти-

ческих гироскопах / А.Н. Дзюба, Л.П. Старосельцев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6. С. 88.

6. Арсеньев В.Д. Расчет максимальных значений инерционных моментов в гироскопических стабилизаторах для маневренных объектов / В.Д. Арсеньев, Е.Р. Рахтеенко // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Т. 14. № 2. С. 1–11.

7. Малютин Д.М. Система стабилизации и управления на волоконно-оптических гироскопах / Д.М. Малютин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 5. С. 121–125.

8. Распопов В.Я. Теория гироскопических систем. Гиростабилизаторы / В.Я. Распопов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 388 с.

9. Королев М.Н. Исследование динамических характеристик гироскопического стабилизатора на волновом твердотельном гироскопе / М.Н. Королев, Д.М. Малютин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 8. С. 129–135.

10. Матвеев В.В. Система сопровождения подвижных объектов на МЭМС-гироскопах / В.В. Матвеев [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 7. С. 437–442. DOI: 10.17587/mau.20.437-442

11. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс // Изд. 3-е. Москва: Техносфера, 2012. 1104 с.

## References

1. Arsenyev VD. Calculation and synthesis of gyrostabilizers for maneuvering objects. Moscow, Bauman MSTU Publ. 2013;1:42.

2. Arsenyev VD. Calculation and synthesis of gyrostabilizers for maneuvering objects. Moscow, Bauman MSTU Publ. 2013;2:35.

3. Malyutin DM. Controlled gyrostabilizer of the increased accuracy on the micromechanical sensitive elements. News of TulGU. Technical Sciences. 2018;(6):326-339. (In Russ.).

4. Raspopov VYa, Malyutin DM. Measuring devices and systems for orientation, stabilization and control. M. Measuring devices and systems for orientation, stabilization and control. News of TulGU. Technical Sciences. 2018;(4):372-386. (In Russ.).

5. Dzyuba AN, Staroseltsev LP. Modeling of errors of the gravimeter gyrostabilizer gyrostabilizer on fiber-optic gyroscopes. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2013;(6):88. (In Russ.).

6. Arseniev VD, Rakhteenko ER. Calculation of maximum values of inertial moments in gyroscopic stabilizers for maneuvering objects. Engineering Journal: Science and Innovation. 2013;(2):1-11. (In Russ.).

7. Malyutin DM. Stabilization and control system on fiber-optic gyroscopes. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2014;(5):121-125. (In Russ.).

8. Raspopov VYa. Theory of Gyroscopic Systems. Gyrostabilizers. Tula, TSU Publ. 2016;388 p.

9. Korolev MN, Malyutin DM. Investigation of the dynamic characteristics of the gyroscopic stabilizer on the wave solid-state gyroscope. News of TulGU. Technical Sciences. 2019;(8):129-135. (In Russ.).

10. Matveev VV, Kislovsky EYu, Milchenko DN, Raspopov VYa, Telukhin SV, Pogorelov MG, Likhoshester VV. Tracking System of Moving Objects on MEMS-Gyroscopes. Mechatronics, automation, control. 2019;(20):437-442. (In Russ.). DOI: 10.17587/mau.20.437-442

11. Gonzalez RC, Woods RE. Digital image processing. Moscow, Tekhnosfera Publ. 2012;1104 p.