

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ С УВЕЛИЧЕННЫМИ УГЛАМИ ОБЗОРА

Предложена схема системы стабилизации и наведения линии визирования (ССиН ЛВ) на основе зеркальной системы, обеспечивающая стабилизацию и слежение за целью при углах горизонтального и вертикального наведения в пределах не менее полусферы. Получена математическая модель кинематического движения ССиН ЛВ с учетом особенностей оптической системы ССиН ЛВ. Предложен способ управления, обеспечивающий работу ССиН при любых углах горизонтального и вертикального наведения, и показана устойчивость кинематической схемы при предложенном способе управления. Приведены результаты математического моделирования рассматриваемой нелинейной системы в среде MatLab.

Введение

Для наблюдения за подвижными и неподвижными целями с борта подвижного объекта широко применяются различные системы стабилизации и наведения линии визирования (ССиН ЛВ). При этом стабилизация оптического изображения возможна за счет помещения в карданов подвес всего блока оптической аппаратуры, либо путем стабилизации отдельных оптических элементов [1,2]. Стабилизация отдельных оптических элементов позволяет существенно уменьшить массу и габариты системы, но во многих случаях уменьшает углы обзора. Большинство существующих ССиН ЛВ построено на основе двухосного карданова подвеса [4-6], и не обеспечивает стабилизацию и слежение за целью при углах вертикального наведения, близких к 90° . Обеспечение обзора в полной полусфере возможно за счет применения дополнительной степени свободы. Подобные системы известны [1, 3, 4], при этом, как правило, рассматривается трех- или четырехосный карданов подвес без учета особенностей оптической системы – оптической редукции и необходимости формирования пути оптического луча. В большинстве работ, посвященных гироскопической стабилизации (Д.С.Пельпор, Л.А.Северов, С.С.Ривкин, А.Д.Александров и др.) многоосные кардановы подвесы рассматриваются применительно к стабилизации по трем осям. Применение трехосного подвеса для двухосной стабилизации и соответствующие алгоритмы управления практически не рассматриваются.

Смирнов Владимир Александрович. Кандидат технических наук, доцент ГОУ ВПО «Тульский государственный университет». Действительный член Академии навигации и управления движением.

Савельев Валерий Викторович. Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой ГОУ ВПО «Тульский государственный университет». Действительный член Академии навигации и управления движением.

Захариков Вячеслав Сергеевич. Аспирант ГОУ ВПО «Тульский государственный университет».

Статья по докладу на 3-й Российской мультikonференции по проблемам управления.

Кинематическая модель и синтез законов управления системы стабилизации и наведения линии визирования

В работе [8] предложена схема ССиН ЛВ, позволяющая обеспечить обзор в полной полусфере и даже более (рис. 1), что достигается дополнительным вращением подвижного зеркала 7 относительно внутренней рамки 3, и зеркалами 4–6. Ограничение углов обзора в нижней полусфере связано только перекрытием оптического луча снизу основанием 2 и наружной рамкой 1. При этом оптическая система с фотоприемным устройством (20) вынесена за пределы системы стабилизации и установлена на основании, что существенно уменьшает габариты системы в целом. Отметим, что в распространенных системах стабилизации с использованием плоского зеркала в двухосном кардановом подвесе [1,7] увеличение углов вертикального наведения требует увеличения длины зеркала, где при максимальном угле вертикального наведения оптического луча $\varphi_{z \text{ опт max}}$ и диаметре входного зрачка объектива d длина рабочей области зеркала определяется формулой $l = d / \cos(\varphi_{z \text{ опт max}} / 2 + 45^\circ)$. Предлагаемая оптическая схема свободна от данного ограничения.

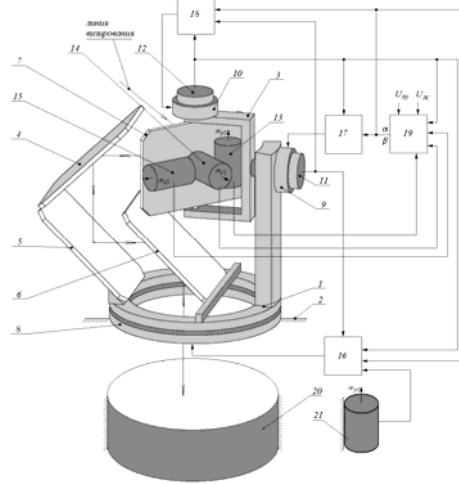


Рис. 1. Конструкция ССиН:

1 – наружная рамка; 2 – основание; 3 – внутренняя рамка; 4–6 – зеркала, жестко связанные с наружной рамкой; 7 – подвижное зеркало; 8–10 – двигатели; 11, 12 – датчики угла; 13, 14, 15, 21 – гироскопические датчики угловой скорости; 16, 17, 18 – блоки управления двигателями; 19 – блок вычисления погрешностей стабилизации линии визирования; 20 – фотоприемное устройство с объективом

Для построения математической модели введем следующие системы координат (СК) (рис.2): $OX_0Y_0Z_0$ – связанная с основанием; $OX_1Y_1Z_1$ – связанная с наружной рамкой; $OX_2Y_2Z_2$ – связанная с внутренней рамкой; $OX_3Y_3Z_3$ – связанная с подвижным зеркалом (для сокращения записи данная система координат развернута на угол 45° по отношению к главным центральным осям подвижного зеркала относительно оси OY_3 так, чтобы в исходном состоянии оси OX_3 и $OX_{3 \text{ опт}}$ совпадали); $OX_{3 \text{ опт}}Y_{3 \text{ опт}}Z_{3 \text{ опт}}$ – связанная с оптической линией визирования; $OXYZ$ – связанная с направлением на цель; φ_y – угол поворота СК $OX_1Y_1Z_1$ относительно $OX_0Y_0Z_0$ вокруг оси OY_0 ; φ_z – угол поворота СК

$OX_2Y_2Z_2$ относительно $OX_1Y_1Z_1$ вокруг оси OZ_1 ; φ_3 – угол поворота СК $OX_3Y_3Z_3$ относительно $OX_2Y_2Z_2$ вокруг оси OY_3 ; $\varphi_{3\text{опт}} = 2\varphi_3$ – угол поворота системы координат $OX_{3\text{опт}}Y_{3\text{опт}}Z_{3\text{опт}}$ относительно $OX_2Y_2Z_2$ вокруг оси OY_3 (здесь множитель 2 обусловлен законом отражения); φ_A , φ_B – углы пеленга, определяющие направление на цель (требуемое направление линии визирования).

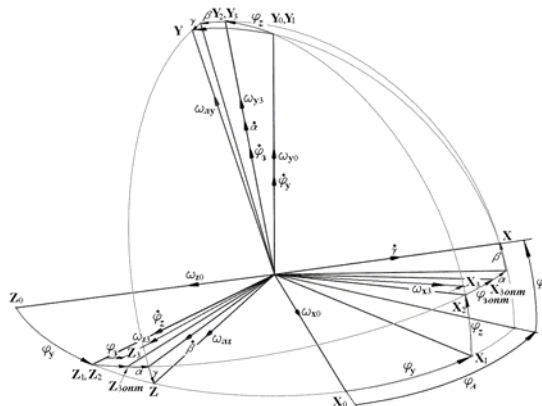


Рис. 2. Система координат (СК)

Углы α , β и γ определяют рассогласование между СК $OX_{3\text{опт}}Y_{3\text{опт}}Z_{3\text{опт}}$ и $OX_1Y_1Z_1$, при этом углы α и β являются погрешностями ССН. Проекции вектора угловой скорости основания на связанные с ним оси обозначены, соответственно, ω_{x0} , ω_{y0} , ω_{z0} ; ω_{xi} , ω_{yi} , ω_{zi} – проекции вектора угловой скорости соответствующего элемента ССН на связанные с ним оси; ω_{ly} , ω_{lz} – проекции угловой скорости цели на оси связанной с ней системы координат; $\dot{\varphi}_3$, $\dot{\varphi}_y$, $\dot{\varphi}_z$ – относительные угловые скорости подвижного зеркала, внутренней рамки и наружной рамки, соответственно.

При отсутствии погрешностей наведения и стабилизации, когда линия визирования наведена точно на цель, оси $OX_{3\text{опт}}$ и OX совпадают и для проекций угловых скоростей справедливо следующее матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} \omega_{x3\text{опт}} \\ \omega_{y3\text{опт}} \\ \omega_{z3\text{опт}} \end{bmatrix} = A_{\text{опт}} \begin{bmatrix} \omega_{x0} \\ \omega_{y0} + \dot{\varphi}_y \\ \omega_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\varphi}_z \sin 2\varphi_3 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_z \cos 2\varphi_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2\dot{\varphi}_3 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$A_{\text{опт}} = \begin{bmatrix} \cos 2\varphi_3 \cos \varphi_y \cos \varphi_z - \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_y & \cos 2\varphi_3 \sin \varphi_z & -\cos 2\varphi_3 \sin \varphi_y \cos \varphi_z - \sin 2\varphi_3 \cos \varphi_y \\ -\cos \varphi_y \sin \varphi_z & \cos \varphi_z & \sin \varphi_y \sin \varphi_z \\ \sin 2\varphi_3 \cos \varphi_y \cos \varphi_z + \cos 2\varphi_3 \sin \varphi_y & \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_z & -\sin 2\varphi_3 \sin \varphi_y \cos \varphi_z + \cos 2\varphi_3 \cos \varphi_y \end{bmatrix}$$

– матрица преобразования из системы координат $OX_0Y_0Z_0$ в систему координат $OX_{3\text{опт}}Y_{3\text{опт}}Z_{3\text{опт}}$.

Раскрывая матричное уравнение (1), получаем кинематические уравнения ССН ЛВ

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_y = \frac{\omega_{y3\text{опт}} - 2\dot{\varphi}_3 + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z}{\cos \varphi_z} - \omega_{y0}, \\ \dot{\varphi}_z = \frac{\omega_{z3\text{опт}} - \dot{\varphi}_y \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_z}{\cos \varphi_3} - \omega_{x0}(\text{tg } 2\varphi_3 \cos \varphi_y \cos \varphi_z + \\ + \sin \varphi_y) - \omega_{y0} \text{tg } 2\varphi_3 \sin \varphi_z - \omega_{z0}(\cos \varphi_y - \text{tg } 2\varphi_3 \sin \varphi_y \cos \varphi_z), \\ \dot{\varphi}_y \cos(2\varphi_3) \sin \varphi_z - \dot{\varphi}_z \sin(2\varphi_3) = \omega_{x3\text{опт}} - \omega_{y0} \cos(2\varphi_3) \sin \varphi_z - \\ - \omega_{x0}[\cos(2\varphi_3) \cos \varphi_y \cos \varphi_z - \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_y] - \\ + \omega_{z0}[\cos(2\varphi_3) \sin \varphi_y \cos \varphi_z + \sin(2\varphi_3) \cos \varphi_y]. \end{cases} \quad (2)$$

Из уравнений (2) следует, что для того чтобы при $\varphi_z \rightarrow 90^\circ$ угловая скорость $\dot{\varphi}_y$ не стремилась к бесконечности, необходимо выполнение условия

$$2\dot{\varphi}_3 = \omega_{y3\text{опт}} + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z. \quad (3)$$

При постоянном выполнении условия (3) угол φ_3 может неограниченно нарастать (например, при наличии постоянной угловой скорости наведения по азимуту $\omega_{y3\text{опт}}$). Поскольку угол поворота подвижного зеркала φ_3 конструктивно ограничен, управление необходимо строить таким образом, чтобы условие (3) выполнялось только при $\varphi_z \rightarrow 90^\circ$. При $\varphi_z \rightarrow 0$ угол φ_3 должен стремиться к нулю. Для выполнения рассмотренных требований на основе условия (3) потребуем выполнения следующего кинематического соотношения

$$\dot{\varphi}_3 = \frac{[\omega_{y3\text{опт}} + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z] \sin^2 \varphi_z - k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z}{2}, \quad (4)$$

где $k > 0$ – коэффициент, задающий отношение между максимальным углом φ_3 и максимальной угловой скоростью $\dot{\varphi}_y$.

Подставляя в первое уравнение системы (2) $\dot{\varphi}_3$ из условия (4), приведем кинематические уравнения к виду

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_3 = \frac{[\omega_{y3\text{опт}} + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z] \sin^2 \varphi_z - k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z}{2}, \\ \dot{\varphi}_y = [\omega_{y3\text{опт}} + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z] \cos \varphi_z + k\varphi_3 \cos \varphi_z - \omega_{y0}, \\ \dot{\varphi}_z = \frac{\omega_{z3\text{опт}} - \dot{\varphi}_y \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_z}{\cos 2\varphi_3} - \omega_{x0}(\text{tg } 2\varphi_3 \cos \varphi_y \cos \varphi_z + \sin \varphi_y) - \\ - \omega_{y0} \text{tg } 2\varphi_3 \sin \varphi_z - \omega_{z0}(\cos \varphi_y - \text{tg } 2\varphi_3 \sin \varphi_y \cos \varphi_z). \end{cases} \quad (5)$$

Проведем анализ устойчивости кинематических уравнений при отсутствии внешних воздействий – качки основания и угловых скоростей наведения линии визирования:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_3 = -\frac{k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z}{2}, \\ \dot{\varphi}_y = k\varphi_3 \cos \varphi_z, \\ \dot{\varphi}_z = -\frac{k\varphi_3 \text{tg } 2\varphi_3 \sin 2\varphi_z}{2}. \end{cases} \quad (6)$$

Примем функцию Ляпунова в виде положительно определенной квадратичной формы $V = m\varphi_3^2 + \varphi_y^2 + \varphi_z^2$, где m – положительный весовой коэффициент. Ее производная имеет вид

$$\frac{dV}{dt} = -mk\varphi_3^2 \cos^2(\varphi_z) - k\varphi_3 \operatorname{tg}(2\varphi_3)\varphi_z \sin(2\varphi_z) + 2k\varphi_3\varphi_y \cos(\varphi_z).$$

Проведем анализ производной функции Ляпунова, учитывая, что в общем случае углы поворота карданова подвеса определены в области $\pm 180^\circ$. Первое слагаемое будет меньше или равно нулю при любых значениях углов. Второе слагаемое будет меньше или равно нулю при $|\varphi_3| \leq 45^\circ$ и $|\varphi_z| \leq 90^\circ$. В рассматриваемой конструкции первое условие будет выполняться всегда. Второе условие может нарушаться, т.к. угол φ_z может быть и больше, чем 90° . Третье слагаемое может иметь любой знак. Таким образом, для устойчивости необходимо выполнение условия

$$m\varphi_3^2 \cos^2 \varphi_z > 2\varphi_3\varphi_y \cos \varphi_z - \varphi_3 \operatorname{tg} 2\varphi_3 \varphi_z \sin 2\varphi_z.$$

Поскольку величина коэффициента m в функции Ляпунова может быть выбрана сколь угодно большой, и при нулевом значении левой части неравенства правая часть всегда будет равна нулю, условие абсолютной устойчивости выполняется.

Для формирования сигналов управления исполнительными двигателями учтем, что малогабаритные волоконно-оптические и микромеханические датчики угловой скорости, не дающие гироскопических моментов, целесообразно установить на подвижном зеркале. При этом ДУС будут измерять угловые скорости ω_{x3} , ω_{y3} , ω_{z3} . С учетом закона отражения угловые скорости оптической линии визирования можно выразить через измеряемые скорости подвижного зеркала следующим образом:

$$\begin{cases} \omega_{x3\text{опт}} = \omega_{x3} \cos \varphi_3 - \omega_{z3} \sin \varphi_3, \\ \omega_{y3\text{опт}} = \omega_{y3} + \dot{\varphi}_3, \\ \omega_{z3\text{опт}} = \omega_{z3} \cos \varphi_3 + \omega_{x3} \sin \varphi_3. \end{cases} \quad (7)$$

Поскольку в режиме стабилизации линия визирования (ось $OX_{3\text{опт}}$) неподвижна, то при малых погрешностях можно записать:

$$\omega_{y3\text{опт}} \approx \dot{\alpha} + \omega_{\text{лy}} \text{ и } \omega_{z3\text{опт}} \approx \dot{\beta} + \omega_{\text{лz}}. \quad (8)$$

Учитывая, что для обеспечения точности управление осуществляется по углам ошибок, на основе (5), (7) и (8) получим систему уравнений, определяющую законы управления всеми тремя исполнительными двигателями:

$$\begin{cases} U_3 = -K_3 \left(\int (\omega_{y3} + \dot{\varphi}_3 - U_{\text{лy}}) dt \right) \sin^2 \varphi_z - k' \varphi_3 \cos^2 \varphi_z, \\ U_y = -K_y \cos \varphi_z \int (\omega_{y3} + \dot{\varphi}_3 - U_{\text{лy}}) dt + k' \varphi_3 \cos \varphi_z, \\ U_z = \frac{-K_z \int (\omega_{z3} \cos \varphi_3 + \omega_{x3} \sin \varphi_3 + U_{\text{лz}}) dt}{\cos 2\varphi_3}, \end{cases} \quad (9)$$

где U_3 , U_y , U_z – задающие воздействия для соответствующих двигателей, $U_{\text{лy}}$ и $U_{\text{лz}}$ – внешние управляющие сигналы, задающие скорости движения линии визирования относительно соответствующих осей, K_3 , K_y , K_z – коэф-

фициенты передачи контуров обратной связи соответствующих двигателей, k' – коэффициент, имеющий назначение, аналогичное k в уравнениях кинематики (5) (новое обозначение введено для различения абстрактного коэффициента в кинематических уравнениях и действительного коэффициента передачи в контуре управления).

Покажем, что управление (9) обеспечивает реализацию кинематических соотношений (5). Приравняем угловые скорости $\dot{\varphi}_3$, $\dot{\varphi}_y$ и $\dot{\varphi}_z$ соответствующим управляющим воздействиям U_3 , U_y , U_z . Для сокращения записи будем считать, что коэффициенты пропорциональности между управляющими воздействиями на двигатели и соответствующими угловыми скоростями входят в коэффициенты K_3 , K_y , K_z и k' :

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{(\omega_{y3} + \dot{\varphi}_3 + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z) \sin^2 \varphi_z - k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z}{2} = \\ & = -K_3 \left(\int (\omega_{y3} + \dot{\varphi}_3 - U_{ly}) dt \right) \sin^2 \varphi_z - k' \varphi_3 \cos^2 \varphi_z, \\ & [\omega_{y3} + \dot{\varphi}_3 + (\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z] \cos \varphi_z + k\varphi_3 \cos \varphi_z - \\ & - \omega_{y0} = -K_y \cos \varphi_z \int (\omega_{y3} + \dot{\varphi}_3 - U_{ly}) dt + k' \varphi_3 \cos \varphi_z, \\ & \frac{\omega_{z3} \cos \varphi_3 + \omega_{x3} \sin \varphi_3 - \dot{\varphi}_y \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_z}{\cos 2\varphi_3} - \\ & - \omega_{x0} (\operatorname{tg} 2\varphi_3 \cos \varphi_y \cos \varphi_z + \sin \varphi_y) - \\ & - \omega_{y0} \operatorname{tg} 2\varphi_3 \sin \varphi_z - \omega_{z0} (\cos \varphi_y - \operatorname{tg} 2\varphi_3 \sin \varphi_y \cos \varphi_z) = \\ & = \frac{-K_z \int (\omega_{z3} \cos \varphi_3 + \omega_{x3} \sin \varphi_3 - U_{lz}) dt}{\cos 2\varphi_3}. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Учитывая (7) и (8) приведем уравнения (10) к виду:

$$\left\{ \begin{aligned} & (\dot{\alpha} + \omega_{ly}) \sin^2 \varphi_z - k\varphi_3 \cos^2 \varphi_z + K'_3 \int (\dot{\alpha} + \omega_{ly} - U_{ly}) dt \sin^2 \varphi_z + \\ & + 2k' \varphi_3 \cos^2 \varphi_z = -(\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin^3 \varphi_z; \\ & (\dot{\alpha} + \omega_{ly} + k\varphi_3) \cos \varphi_z + K_y \cos \varphi_z \int (\dot{\alpha} + \omega_{ly} - U_{ly}) dt - k' \varphi_3 \cos \varphi_z = \\ & = -(\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z \cos \varphi_z + \omega_{y0}; \\ & \frac{\dot{\beta} + \omega_{lz}}{\cos 2\varphi_3} + \frac{K_z \int (\dot{\beta} + \omega_{lz} - U_{lz}) dt}{\cos 2\varphi_3} = \\ & = \dot{\varphi}_y \operatorname{tg} 2\varphi_3 \sin \varphi_z + \omega_{x0} (\operatorname{tg} 2\varphi_3 \cos \varphi_y \cos \varphi_z + \sin \varphi_y) + \\ & + \omega_{y0} \operatorname{tg} 2\varphi_3 \sin \varphi_z + \omega_{z0} (\cos \varphi_y - \operatorname{tg} 2\varphi_3 \sin \varphi_y \cos \varphi_z). \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Разделяя управляющие воздействия и погрешности, и полагая $k = 2k'$, $K'_3 = K_y$, получаем:

$$\left\{ \begin{aligned} & \omega_{ly} = U_{ly}; \quad \omega_{lz} = U_{lz}; \\ & \alpha = -(\omega_{x0} \cos \varphi_y - \omega_{z0} \sin \varphi_y) \sin \varphi_z / K'_3; \\ & \varphi_3 = \omega_{y0} / (k' \cos \varphi_z); \\ & \beta = [\dot{\varphi}_y \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_z + \\ & + \omega_{x0} (\sin 2\varphi_3 \cos \varphi_y \cos \varphi_z + \sin \varphi_y \cos 2\varphi_3) + \omega_{y0} \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_z + \\ & + \omega_{z0} (\cos 2\varphi_3 \cos \varphi_y - \sin 2\varphi_3 \sin \varphi_y \cos \varphi_z)] / K_z. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Уравнения (12) показывают, что при выбранном способе управления погрешности α и β будут ограничены при любых углах горизонтального и вертикального наведения. Погрешности, возникающие при использовании предлагаемого алгоритма управления, являются систематическими и обусловлены неполным учетом качки основания при формировании управляющих сигналов. Возможен и полный учет качки основания на основе уравнений (5), однако в этом случае существенно возрастет сложность вычисления управляющих воздействий. Поскольку с увеличением коэффициентов передачи K_z и K_y выявленные погрешности будут уменьшаться, усложнение алгоритмов управления представляется нецелесообразным. Из уравнений (12) также следует, что для того, чтобы угол φ_z был ограничен при любых условиях, в управляющее воздействие U_y необходимо добавить управление по угловой скорости ω_{y0} , установив, например, дополнительный ДУС на основании 2. В этом случае закон управления по каналу наружной рамки примет вид

$$U_y = -K_y \cos \varphi_z \int (\omega_{y3} + \dot{\varphi}_z - U_{\text{дв}}) dt + k' \varphi_z \cos \varphi_z - \omega_{y0}.$$

Вычисление угловой скорости ω_{y0} возможно и по данным ДУС, установленных на зеркале, но, учитывая, что дополнительный ДУС может быть выбран достаточно грубым, представляется целесообразным использование дополнительного микромеханического ДУС вместо применения процедуры преобразования угловой скорости ω_{y0} на оси связанной с основанием СК $Ox_0Y_0Z_0$.

Результаты моделирования

На рис. 3 и 4 приведены результаты моделирования движения линии визирования при $K_z = K_y = K_x = 100000$, $k' = 2000$ и гармонической качке основания с параметрами, приведенными в таблице. Также заметим, что, поскольку каждое из кинематических уравнений замкнутой системы (11) относительно переменных состояния α и β является дифференциальным уравнением первого порядка, устойчивость обеспечивается при любых значениях коэффициентов передачи.

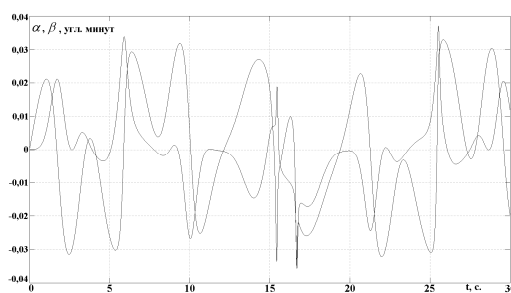


Рис. 3. Погрешности стабилизации линии визирования по азимуту и высоте

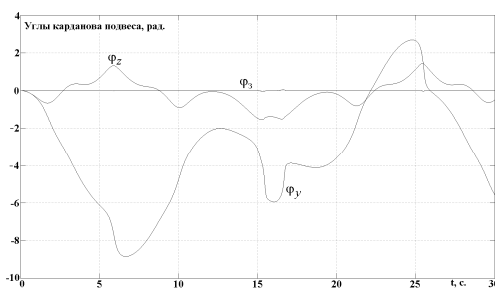


Рис. 4. Изменение углов карданова повеса при качке основания

Ось системы координат Параметр	$i = x$	$i = y$	$i = z$
Амплитуда угловой скорости качки основания ω_{i0} , рад/с	0,2	1,5	1
Частота качки основания ν_{i0} , Гц	0,11	0,08	0,13

Выводы

Результаты моделирования показали работоспособность предложенной кинематической схемы и способа управления при любых значениях углов пеленга цели φ_A и φ_B . Предложенный способ управления обеспечивает работу системы стабилизации и наведения линии визирования при любых углах горизонтального и вертикального наведений и устойчивость кинематической схемы.

На конструктивную схему ССН получен патент РФ [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Автоматическая** стабилизация оптического изображения/ Д. Н. Еськов, Ю.П. Ларионов, В.А. Новиков и др. – Л.: Машиностроение, 1988.–240 с.
2. **Бабаев А. А.** Стабилизация оптических приборов. – Л.: Машиностроение, 1975. - 190 с.
3. **Ривкин С.С.** Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. – М.: Наука, 1978.– 320 с.
4. **Северов Л.А.** Механика гироскопических систем. Уч. пособ. – М.: изд-во МАИ, 1996.–212 с.
5. **Вертолетные** оптико-электронные системы наблюдения и разведки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.bnti.ru
6. **Уральский** оптико-механический завод [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.uomz.ru>.
7. **ЦКБ Арсенал** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zavodarsenal.kiev.ua>.
8. **Пат. №2414732** РФ. – Устройство стабилизации линии визирования. Оpubл. 20.03.2011.

Abstract. The paper considers a line of sight (LOS) stabilization and pointing system (LSPS) based on a mirror system, which provides target tracking for horizontal and vertical pointing within 180° . A mathematical model of LSPS kinematic motion is obtained, which takes into consideration the specifics of LSPS optical system. A control method is proposed, which ensures LSPS operation under any horizontal and vertical pointing angles, and provides stability of the kinematic system. Results of MatLab modeling of the considered nonlinear system are given.

Key words: stabilization system, line of sight, horizontal and vertical pointing angles.