



УДК 629.7.05 : 681.777.8(048)

## Пространственно-частотно-временные критерии оценки качества оптико-электронного автоколлимационного измерителя

Е.С. Парняков, Мухаммад Рашик Улла Бейг Мирза

Национальный авиационный университет

*Показано формализованное представление оптико-электронного автоколлимационного измерителя следящей системы угловой ориентации объекта, например, ограниченно-подвижного объекта — инерциальной навигационной системы, и критерии, по которым необходимо оценивать основные показатели качества его состояния и точности ориентации объекта. Представлены условия применения данных критериев в случае детерминированных случайных сигналов.*

*ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНО-ЧАСОВІ КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО АВТОКОЛІМАЦІЙНОГО ВИМІРЮВАЧА, Парняков Є.С., Мухаммад Рашик Улла Бейг Мирза. — Показано формалізоване представлення оптико-електронного автоколімаційного вимірювача сліджучої системи кутової орієнтації об'єкта, наприклад, обмежено-рухомого об'єкта — інерційної навігаційної системи, та критерії, за якими необхідно оцінювати основні показники якості його стану і точності орієнтування об'єкта. Представлені умови застосування даних критеріїв у випадку детермінованих випадкових сигналів.*

*SPACE-TIME-FREQUENCY CRITERIA OF THE OPTOELECTRONIC AUTOCOLLIMATION METER QUALITY ESTIMATION, by Parnyakov E.S., Muhammad Rasheeq Ullah Baig Mirza. — The formalized representation of the optoelectronic autocollimation meter of the angular orientation servomechanism (e.g. bounded movable object) — inertial navigation system, and criteria of estimation of its state quality and the object orientation precision are demonstrated. Conditions of these criteria employment in the case of deterministic random signals are presented.*

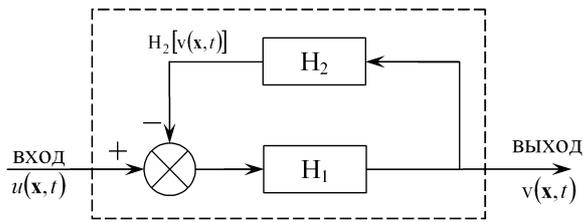
Оптико-электронный автоколлимационный измеритель (ОЭАИ) является частью оптической следящей системы угловой ориентации объекта. Он содержит задающую (опорную) часть в виде коллиматора и приемную часть, состоящую из оптической системы, фотоприемного устройства, электронного блока и других элементов систем управления. По существу, задающая часть является обратной оптической связью в этом измерителе. По этой причине она может быть использована для следующих целей:

- итеративной обработки изображения и восстановления (для лучшей аттестации);
- масштабирования изображения, кодирования и др.

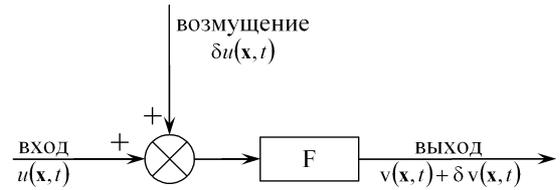
Световой поток, принимающая часть и их пространственно-частотно-временные структуры не являются совершенными и постоянными в пространстве и времени.

Известно, что понятие стабильности означает, что система (в данном случае — этот измеритель) является стабильной, если ее выходной сигнал не изменяется при введении некоторых возмущений (оптических, электронных и др.). Принимающая часть этой системы (измерителя) описывается оператором  $H_1$  (рис. 1), который преобразует вход  $U$  (световой поток изображения подсвечиваемой марки) в выход  $V$  (световой поток, вышедший из объектива и падающий на фотоприемное устройство и формирующий изображение марки на его светочувствительном регистре), равный

$$V(\mathbf{x}, t) = F[U(\mathbf{x}, t)].$$



**Рис. 1.** Обобщенная схема автоколлимационного оптико-электронного измерителя как системы автоматического управления



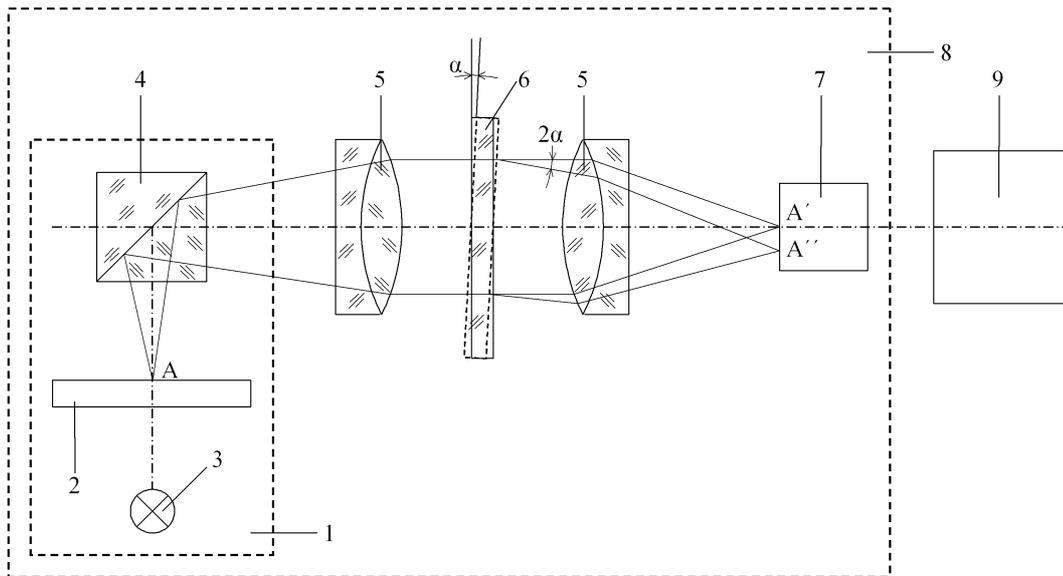
**Рис. 2.** Обобщенная схема задающей и принимающей частей с оператором преобразования  $F$

При наличии некоторого возмущения  $\delta U(\mathbf{x}, t)$  наблюдаются также возмущение на выходе  $\delta V(\mathbf{x}, t)$ . Данная система является стабильной, если оператор  $F$  согласуется с нормой  $\delta U$  (условие стабильности: для достаточно малого  $-\eta < \|\delta U\| < +\eta$  существует  $\|\delta V\| < \varepsilon$ ). Для нелинейного оператора  $F$  должна быть использована непрерывность малого входного сигнала  $U$ . В этом случае существует стабильная и нестабильная области входной пространственной структуры светового потока. Обобщенная схема данной системы с оператором  $F$  представлена на рис. 2. Условная развернутая схема обобщенного автоколлимационного следящего оптико-электронного измерителя с формируемой пространственно-частотно-временной маркой представлена на рис. 3.

Возможные критерии оценки показателей качества системы могут быть следующими.

**Критерий 1.** Линейная система с оператором  $F$  стабильна, если и только если ограниченный входной сигнал дает ограниченный выходной сигнал:  $|U(\mathbf{x}, t)| < U_{\max}$  приводит к  $|V(\mathbf{x}, t)| < V_{\max} < \infty$ .

Система, представленная на рис. 1, описывается следующим интегральным уравнением для



**Рис. 3.** Условная развернутая схема обобщенного автоколлимационного следящего оптико-электронного измерителя с формируемой пространственно-частотно-временной маркой.

1 — блок формирования пространственно-частотно-временной марки, 2 — марка, 3 — источник света, 4 — светоделитель, 5 — объектив, 6 — контрольный элемент — пространственно-частотный фильтр (показан условно), 7 — фотоэлектрический прибор с зарядовой связью — анализатор положения изображения марки, 8 — автоколлимационный оптико-электронный измеритель, 9 — микропроцессорное устройство вычисления,  $\alpha$  — угол наклона контрольного элемента, например, зеркала.

выходного сигнала:

$$V(\mathbf{x}, t) = \frac{H_1}{1 - H_1 H_2} U(\mathbf{x}, t), \quad (1)$$

где  $H_1, H_2$  — соответствующие операторы задающей и принимающей частей системы;  $\frac{H_1}{1 - H_1 H_2} \equiv F$ .

Преобразование Фурье для выражения (1) — это

$$\tilde{V}(N_2, t) = \frac{H_1}{1 - H_1 H_2} \tilde{U}(N_1, t) \quad (2)$$

Символ  $\tilde{\phantom{x}}$  означает спектр Фурье,  $N_1, N_2$  — пространственные частоты принимающей и задающей частей системы соответственно.

Из уравнения (2) видно, что каждая единственная пространственная частота  $N_2$ , излучаемая из задающей части, должна пропускаться через принимающую часть, однако приемная часть воспринимает пространственные частоты только  $N_2$ . На практике необходимо, чтобы  $N_1 = N_2 = N$ . Тогда (2) можно представить как

$$\tilde{V}(N, t) = \frac{H_1}{1 - H_1 H_2} \tilde{U}(N, t). \quad (3)$$

Всегда существует условие, что у приемной части имеются как пространственные, так и временные постоянные.

Преобразование Лапласа во времени представляют как

$$\tilde{V}(N, p) = \int_0^{\infty} V(N, t) \exp(-pt) dt, \quad (4)$$

где  $\exp(-pt) = \exp(-vt) \exp(-i\omega t)$  (здесь  $v$  — скорость изменения пространственной структуры,  $\omega$  — круговая частота).

На практике могут иметь место два случая:

1. Если  $H_2 \neq H_1$ , то контрольный (отражательный) элемент должен выполнять роль пространственно-частотно-временного фильтра.
2. Если  $H_2 = H_1$ , то контрольный элемент используется чисто как отражательный.

**Критерий 2.** Система с оператором  $F$  — стабильная система, если и только если все полюсы передаточной функции существуют в ее отрицательной действительной части для всех пространственных частот  $N$ .

Поскольку в цифровых системах имеют место дискретные по времени сигналы, то вместо оператора Лапласа используют  $z$ -преобразование

$$\tilde{V}(N, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \tilde{V}(N, n\tau) z^{-n}, \quad (5)$$

$$\tilde{V}(N, z) = \frac{H_2(N, z)}{1 - H_1(N, z)H_2(N, z)} \tilde{U}(N, z) = F(N, z). \quad (6)$$

**Критерий 3.** Данная пространственно-частотно-временная система является стабильной тогда и только тогда, если все полюса передаточной функции  $F(N, z)$  находятся внутри единичного круга комплексной плоскости для всех пространственных частот  $N$ .

Выходной сигнал рассматриваемого оптико-электронного измерителя пропорционален числу

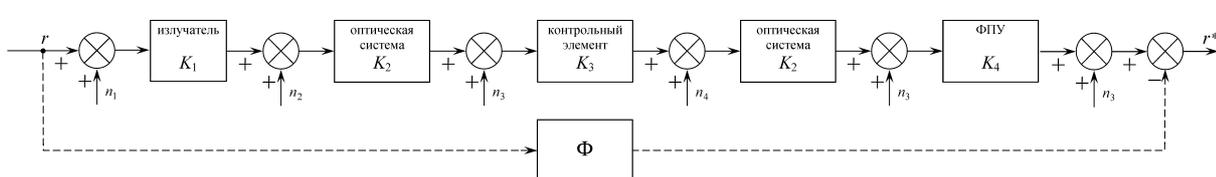


Рис. 4. Структурная схема оптико-электронного измерителя

электронов  $n_e$ , т.е.

$$n_e = \frac{\tau \eta_0 K_\Sigma t_{\text{эксп}}}{\hbar c} \int g(\lambda) f(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (7)$$

где  $\tau$  — коэффициент светопропускания оптической системы;  $\eta_0$  — квантовый выход фотоприемного устройства;  $K_\Sigma$  — коэффициент пропорциональности (масштабирования, усиления);  $g(\lambda)$  — импульсная спектрально-временная реакция;  $f(\lambda)$  — поток излучения;  $\lambda$  — длина световой волны;  $\hbar$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света.

Следует отметить, что число фотонов  $n_{ph}$ , мощность излучения  $\Phi_\lambda$ , время экспозиции  $t_{\text{эксп}}$  (освещения) и средняя длина волны  $\lambda_0$  излучения находятся в следующей зависимости:

$$n_{ph} = \Phi_\lambda \frac{\lambda_0}{\hbar c} t_{\text{эксп}}. \quad (8)$$

Из уравнений (7), (8) следует, что выходной сигнал пропорционален энергии излучения, падающей на фотоприемное устройство (ФПУ), отношению между временем освещения и считывания, зависящими от конкретного режима работы системы.

Пространственно-частотно-временная реакция рассматриваемого измерителя представляет собой конволюцию пространственно-частотно-временной реакции оптической системы, в том числе и входящих в нее таких элементов, как фоконов, световодов и т.д., и пространственно-частотно-временной реакции ФПУ.

По отношению к приборной системе координат принято, что

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, \quad Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T, \quad r = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$$

При трансформировании этих векторов оптико-электронной системой формируется вектор

$$\bar{r}_1 = C_1 C_2 C_3 \bar{r},$$

где  $C_1$  — матрица трансформирования оптико-электронной системой,  $\bar{r}_1$  — измеряемый вектор,  $C_2$  — матрица преобразования координат,  $C_3$  — матрица действия контрольного элемента.

Для обнаружения изменений между двумя последовательными экспозициями изображения разделяют и регистрируют, проводят коррекцию передачи, вращения и масштаба разности.

**Критерий 4.** Качество оптико-электронного измерителя определяют по разности выходного  $r(t)$  ФПУ и идеального (расчетного)  $j(t)$  сигналов

$$\varepsilon(t) = j(t) - r(t).$$

Погрешность измерителя содержит детерминированную составляющую, вызванную, например, абберациями оптической системы

$$\bar{\varepsilon}(t) = M[\varepsilon(t)].$$

При этом за показатель качества принимают функционал

$$I = \int_0^T \varepsilon^{-1} \mathbf{R} \varepsilon(t) dt = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} \text{tr} [\varepsilon(s) \mathbf{R} \varepsilon^{-1}(s)] ds$$

где  $\varepsilon(t)$  — 2-мерный вектор детерминированной составляющей погрешности,  $\varepsilon(s)$  — Фурье-образ этой составляющей,  $\mathbf{R}$  — весовая симметрическая неотрицательно-определенная матрица размерности  $2 \times 2$ ,  $\text{tr}$  — след матрицы, « $^{-1}$ » — обозначение обратной матрицы.

**Критерий 5.** Из-за флуктуаций потока излучения излучателя и сигнала ФПУ имеет место случайная погрешность

$$\overset{\circ}{\varepsilon}(t) = \varepsilon(t) - M[\varepsilon(t)].$$

За показатель качества в этом случае принимают функционал

$$\varepsilon(t) = M \left[ \overset{\circ}{\varepsilon}^{-1}(t) \mathbf{R} \overset{\circ}{\varepsilon}(t) \right] = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} \text{tr} [\mathbf{R} \mathbf{S}_{\varepsilon\varepsilon}(s)] ds$$

где  $\mathbf{S}_{\varepsilon\varepsilon}(s)$  — матрица спектральных плотностей случайной составляющей погрешности измерителя.

Структурная схема измерителя представлена на рис. 4. Из этой схемы следует, что

$$\left\{ \left[ \left[ \left[ (r+n_1)K_1+n_2 \right] K_2+n_3 \right] K_3+n_4 \right] K_2+n_3 \right] K_4+n_5 \right\} - \Phi r = \varepsilon,$$

где  $r = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$  — в случае двумерного сигнала,  $j = \Phi r$  — расчетный сигнал,  $r_1$  — измеряемый сигнал,  $r_1 = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{pmatrix}$  — сигнал, если он двумерный,  $K_1, K_2, K_3, K_4$  — коэффициенты передачи излучения, оптической системы, контрольного элемента и ФПУ соответственно,  $n_1, \dots, n_5$  — шумы.

**Критерий 6.** Дополнительно к отмеченным ранее показателям качества служит параметр — функция когерентности, определяемая как

$$\gamma_{r_1 r}^2(s) = \frac{|\mathbf{S}_{r_1 r}(s)|^2}{\mathbf{S}_{r_1}(s)\mathbf{S}_r(s)}$$

где  $\mathbf{S}_{r_1}(s), \mathbf{S}_r(s)$  — спектральные плотности программируемого и выходного сигналов,  $\mathbf{S}_{r_1 r}(s)$  — взаимная спектральная плотность сигналов  $r_1, r$ .

В случае двумерной системы оценку следует вести по так называемой множественной когерентности. Корреляционную характеристику измерителя вычисляют как

$$M[rr'] = \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^N \mathbf{A}(l, m) [|\mathbf{S}_1(l, m) - \mathbf{S}_2(l, m)|]^2,$$

где  $\mathbf{A}(l, m)$  — весовая матрица потока излучения марки,  $\mathbf{S}_1(l, m)$  — спектральная плотность светового потока в приемной части,  $\mathbf{S}_2(l, m)$  — спектральная плотность светового потока излучающей части + контрольного элемента,  $l, m$  — координаты марки (матрицы).

Применение волоконно-оптических фоконов с  $K_6$  (коэффициентом пространственного трансформирования) позволяет повысить разрешающую способность в  $K_6$  раз при уменьшении освещенности в  $K^2/\tau$  раз ( $\tau$  — коэффициент пропускания оптической системы и фокона), что позволяет уменьшить фокусное расстояние оптической системы приемной части соответственно в  $K_6$  раз.

Рассмотренные критерии оценки показателей качества оптико-электронного измерителя как части оптико-электронной углоизмерительной следящей системы позволяют дать не только общее представление о нем, но и оценить качественные особенности его в составе указанной системы и отличие этой системы от существующих автоматических следящих систем.

В данной статье не рассмотрены другие известные критерии оценки качества оптико-электронного измерителя с точки зрения систем автоматического управления.

Подробный расчет показывает, что в существующих оптико-электронных следящих системах всегда имеется зона нечувствительности вследствие, например, запаздывания, статической и динамической погрешностей управления, трения в последней кинематической паре исполнительного привода. Она увеличивает погрешность углового ориентирования объекта. Некоторое улучшение качества, то есть уменьшение этой погрешности, достигается путем введения стабилизирующих звеньев, дифференциальных цепочек, дополнительных обратных связей и др.

Как отмечалось ранее, в рассмотренной системе за счет измерения остаточного сигнала рассогласования точность углового ориентирования объекта за счет учета или компенсации зоны нечувствительности значительно повышена по сравнению с точностями известных систем такого типа.

1. Парняков Е.С. Оптические автоколлимационные системы глобой ориентации объекта с автоматическим и программным управлением. Обзор № 4563. — М.: ЦНИИИ и ТЭИ, 1988. — 140 с.
2. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1977. — 600 с.
3. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. — М.: Мир, 1971. — 495 с.

Поступила в редакцию 19.10.2004