

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БСКР

Блок строчной и кадровой развертки (БСКР) создан для использования в качестве двухкоординатного оптического развертывающего устройства в телевизионной аппаратуре специального назначения [1]. Он успешно функционировал в составе оптико-механического комплекса (ОМК) телевизионного сканирующего радиометра (ТСР) геостационарного КА «Электро», осуществляя строчно-кадровую телевизионную развертку изображения подстилающей поверхности и облачного покрова Земли посредством высокоточного поворота сканирующего зеркала (СЗ) вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

Аналогичное по назначению, структуре, конструктивным и иным техническим решениям, но существенно более динамичное двухкоординатное оптическое развертывающее устройство ПМСУ-В проходит натурную эксплуатацию в составе сканирующего телевизионного устройства МСУ-В на борту КА «ОКЕАН».

В настоящей статье приводятся результаты исследования вопросов обеспечения и контроля качества выполнения развертывающим устройством основной задачи – воспроизведения траектории движения СЗ и построения телевизионного раstra с минимальными искажениями.

Оптико-кинематическая схема и системы координат БСКР в составе ОКМ представлены на рис.1, где СЗ – сканирующее зеркало, O_t - эквивалентный объектив ОКМ, ФПУ – фотоприемное устройство с центрально-симметричным расположением фотоприемников; $X_0O_0Y_0Z_0$ – неподвижная система координат, оси которой совпадают с осями кардана СЗ и нормалью к нему при равных нулю углах поворота; α и β - углы поворота зеркала вокруг осей строчной и кадровой развертки; $XOYZ$ – неподвижная система координат в плоскости объекта (подстилающей плоскости), в которой ось OX совпадает с направлением кадровой развертки (НКР), ось OY – с направлением строчной развертки (НСР); $X'O'Y'Z'$ - неподвижная система координат в фокальной плоскости (плоскости изображения) объектива O_t , причем ось OZ' совпадает с оптической осью объектива.

$$\sin \beta = \Delta\beta_0 \left(N_{ш} - \frac{N_0}{2} \right), \quad (2)$$

где α, β - программные значения углов поворота СЗ вокруг осей С-С и К-К, рад; ω_0 - программное значение скорости поворота СЗ вокруг оси С-С при $\alpha=0, \beta=0$, рад/с; t - текущее время, с; T - период движения СЗ вокруг оси С-С, с; N - номер полупериода строчного движения СЗ; $\Delta\beta_0$ - величина шагового приращения угла β , рад; $N_{ш}$ - число шаговых перемещений вокруг оси К-К, предшествовавших данному интервалу времени рабочего хода; N_0 - полное число шаговых перемещений при выполнении рабочей программы.

Нелинейный характер зависимостей (1) и (2) определяется измерительными характеристиками интерферометрического измерителя угловых перемещений (ИУП), специально разработанного для БСКР в качестве двухкоординатного датчика угловых перемещений СЗ, метрологические характеристики которого в основном определяют и метрологические характеристики БСКР в целом [3].

Основные метрологические характеристики БСКР

Диапазон углов поворота СЗ вокруг осей строчной и кадровой разверток соответственно, угл. град.	$\alpha = 4,36;$ $\beta = 5,9$
Период движения СЗ вокруг оси С-С ₁ , с	1
Предельные (допустимые) отклонения от законов движения СЗ абсолютных значений α и β , не более, рад	$\pm 7,5 \cdot 10^{-5}$
Случайная погрешность углового положения СЗ в пределах времени рабочего хода t_p , не более, рад	$\pm 7,5 \cdot 10^{-6}$
(время рабочего хода t_p определяется совокупностью временных интервалов в пределах: $T/2(N-0,9) \leq t_p \leq T/2(N-0,1)$)	

Принципы построения и расчетный анализ характеристик ПСЗ и ИУП подробно рассмотрены в работах [1,3]. В работе [3] приведены уравнения предельных основных и дополнительных систематических погрешностей ИУП, расчетные значения ошибок углового положения СЗ с учетом физических и конструктивных параметров ИУП и условий эксплуатации ПСЗ, а также результаты экспериментальных (штатных) проверок ошибок с использованием стандартной аппаратуры. Указанные точностные характеристики БСКР подтверждены и расчетом, и экспериментальной проверкой с использованием контрольно-проверочной аппаратуры (КПА). При этом случайные ошибки углового положения СЗ оценивались рас-

согласованием (разницей) числа управляющих импульсов блока управления разверткой ПСЗ и числа измерительных импульсов от ИУП. Выбранная методика оценки случайных ошибок обусловлена целью упрощения КПА и обеспечения возможности оперативной проверки текущих погрешностей.

Инструментальный контроль параметров закона движения СЗ осложняется отсутствием стандартных средств измерения текущих углов при повороте объекта контроля вокруг двух осей вращения одновременно и независимо, имеющих разрешающую способность не хуже 1 угл. с. Задача инструментального контроля параметров закона движения СЗ при его повороте вокруг осей развертки была решена методом анализа характеристик раstra, создаваемого БСКР в плоскости развертки изображения. В основе метода лежит регистрация на фотопленке положения светового пятна, положение которого определяется СЗ при выполнении программы позиционирования в заданной координате раstra. При этом пространственное положение СЗ относительно базовой системы отсчета углов контролируется с помощью теодолита. При выполнении программы развертки при прохождении СЗ выбранной точки раstra производится повторная (многократная) экспозиция фотопленки. Величина несовпадения на пленке отметок позволяет оценить отклонение углового положения СЗ в процессе развертки от контрольного положения. Для проведения указанных измерений был разработан исследовательский стенд-фоторегистратор, с оригинальным устройством сканирования [4]. На рис. 2 приведена оптическая схема регистратора совместно с упрощенной структурной схемой.

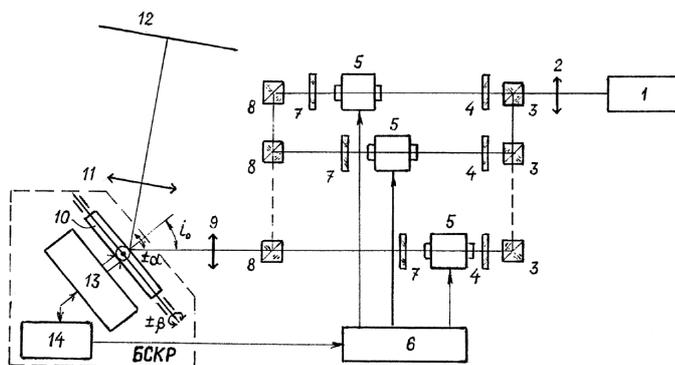


Рис. 2. Оптическая схема регистратора

Регистратор содержит лазер 1 типа ЛГ-70, объектив 2, устройство разделения световых пучков, состоящее из светоделительных призм 3 и формирующее число пучков, равное числу фотоприемников ФПУ в строчном скане ОМК ТРС (для КА «Электро» для видимого диапазона спектра VIS оно равно восьми), далее в каждом полученном пучке установлены ослабители 4, акустооптические модуляторы 5 типа МЛ-201 с блоками управления 6 и пластины 7 для регулировки направления распространения световых пучков, затем расположено устройство сведения пучков, состоящее из светоделительных призм 8 (аналогичных призмам 3), которые пространственно сближают пучки так, что введенные пластинами 7 угловые соотношения, определяющие направления распространения пучков, сохраняются; далее по ходу сведенных пучков расположены объектив 9, сканирующее зеркало 10 блока ПСЗ 13, работающего под управлением блока БУР 14, фокусирующий объектив 11 и плоскость раstra 12.

Для регистрации информации о строении раstra могут быть использованы фотопленки для анализа всего раstra в целом (и фрагментов) и матричные фотоприемники для анализа отдельных участков («точек») раstra. В последнем случае возможна автоматизация измерений координат записывающих лучей в исследуемом участке раstra (и, соответственно, метрологических характеристик БСКР) с использованием ПК и требуемого программного обеспечения. Однако этот (фотоэлектрический) вариант регистрации значительно сложнее и дороже при реализации, чем фотографический, поэтому была использована фотографическая регистрация положений записывающих лучей в плоскости раstra с последующими измерениями координат и размеров их «следов» (пятен) на экспонированной фотопленке с помощью регистрирующего микрофотометра (или измерительного микроскопа).

При анализе геометрии растрового изображения следует учитывать искажения, вносимые фокусирующим объективом 11, в первую очередь его полевыми аберрациями (в основном дисторсией и кривизной изображения). Очевидно, что аберрационные искажения раstra важно учитывать при анализе статических и систематических погрешностей БСКР, а при исследованиях динамических и случайных погрешностей их влиянием можно пренебречь. Поскольку основной задачей экспериментального исследования метрологических характеристик БСКР с использованием фоторегистратора была оценка именно динамических и случайных погрешностей положений СЗ в режиме рабочего сканирования, то это позволило использовать в качестве фокусирующего объектива 11 менисковую

линзу (обеспечивающую плоскую поверхность монохроматического изображения раstra) с фокусным расстоянием $f_{11} \approx 1600$ мм.

При заданных углах (α и β) качания СЗ линейные размеры растрового кадра равны $\sim 500 \times 500$ мм, а для обеспечения требуемого разрешения (число строк в растре $N_c = 11552$) размер записывающего сфокусированного лазерного пятна («пиксела») не превышал $\varnothing \leq 0,045$ мм (в угловой мере $\leq 6''$), что соответствует смещению СЗ на угол $\leq 3''$.

При исследовании случайных погрешностей использовалась дискретная запись пятен на фотопленке, т.е. фиксировалось «мгновенное» положение записывающих лучей в заданных точках раstra в рабочем режиме БСКР. Время экспозиции задавалось частотой управляющих импульсов блока управления b и составляло $\sim 0,2$ мкс. Быстродействие модулятора МЛ-201, работавшего в режиме фотозатвора, определялось временем нарастания импульса лазерного излучения (по уровню $1/e^2$ по интенсивности и дифракционной расходимости лазерного пучка) и составляло около 0,05 мкс. С другой стороны временной интервал прохождения записывающим лучом «пиксела» раstra составляет $t_{\text{эл}} = t_p / N_c \approx 13$ мкс.

Таким образом, влиянием инерционности модулятора (фотозатвора) и блока управления на погрешность положения записывающего луча при дискретной записи «точек» раstra можно пренебречь и сделать общий вывод о том, что инструментальные погрешности самого регистратора не оказывали ощутимого влияния на исследованные случайные погрешности БСКР.

Программа исследований включала запись в рабочем режиме БСКР и последующий анализ фрагментов раstra в девяти участках размерами 24×24 мм² в окрестностях заданных контрольных точек, координаты которых задаются технологической программой БСКР. Технологическая программа предусматривает фиксацию (позиционирование) СЗ в любой из девяти заданных точек, включая центр кадра (среднее положение СЗ) и границы кадра: этим позициям СЗ соответствуют точки I, II, III...IX раstra (рис.1) в плоскости наблюдения (на подстилающей поверхности). Случайную погрешность измерений обычно оценивают средней квадратической ошибкой (СКО) или стандартом σ (при нормальном законе распределения ошибок). Однако не зная априори закона распределения ошибок и в связи с большой трудоемкостью процедуры измерений положений пятен при использовании серии однократных рабочих циклов развертки раstra была использована возможность суммарной записи положений пятен при десятикратном рабочем цикле БСКР, что позволило сразу получить интегральные пятна для десятикратной серии записей каждой исследуемой точки раstra. Изме-

ря на негативном изображении пятен на фотопленке отклонения размеров суммарных пятен по двум координатам от среднего размера p_0 единичного пятна, определялось все поле случайных ошибок в положении записывающих лучей и, соответственно, угловых положений СЗ БСКР. Функции распределения оценивались по плотностям распределения путем анализа регистрограмм оптических плотностей суммарных пятен. Регистрограммы получали на микрофотометре регистрирующем ИФО-451 в масштабе 200:1 с размерами измерительной щели $0,02 \times 0,2 \text{ мм}^2$ при последовательном сканировании (перемещении) фотопленок с исследуемыми пятнами по двум направлениям, соответствующим направлениям строчного и кадрового движений записывающих лучей. Практически для всех точек раstra регистрограммы оптических плотностей интегральных пятен имели вид усеченного «колокола», близкого к трапеции; это позволило сделать вывод, что положение отдельных пятен в суммарном пятне подчиняется ближе равномерному, чем нормальному закону распределения. Впрочем, вполне вероятно, что при большом числе (>50) серий регистрации интегральных пятен указанное распределение приблизится к нормальному [5].

В таблице приводятся результаты измерений размеров (p_x и p_y) интегральных пятен по двум координатам с использованием регистрограмм и расчетные значения соответствующих случайных погрешностей (ψ_α и ψ_β), вычисленных (при $p_0 = 0,045 \text{ мм}$) по формулам:

$$\pm \psi_\alpha \approx \frac{p_y - p_0}{4f_{11}}; \quad \pm \psi_\beta \approx \frac{p_x - p_0}{4f_{11}}.$$

Численные значения размеров пятен были измерены с погрешностью не более $\pm 5\%$ и округлены до $0,005 \text{ мм}$.

По результатам исследований случайных ошибок в положении СЗ в рабочем режиме БСКР с использованием фоторегистратора следует вывод, что указанные ошибки не превышают заданного значения $\pm 7,5 \text{ мкрад}$ ($\pm 1,5 \text{ угл.с}$).

Другим важным фактором, влияющим на метрологические характеристики растрового изображения, получаемого бортовым телевизионным комплексом, в состав которого входит БСКР, является геометрия развертки раstra: форма раstra и стыковка строк (сканов). Как уже было указано, выбранная по конструктивным соображениям схема взаимного расположения координатных осей БСКР и телескопа ОМК (см. рис.1) вносит искажения в геометрию развертки изображения. Укажем эти искажения и возможности их

коррекции путем введения соответствующих поправок в заданную программу движения СЗ согласно зависимостям (1) и (2). Расчетный анализ геометрии раstra с двумя вариантами расположения записывающих лучей в схеме фоторегистратора с БСКР (см. рис.2) приведен в [2], причем параметры варианта с центрально-симметричным сканом (см. рис.1) соответствуют схеме ОМК с БСКР в составе ТСР (для обратного хода лучей VIS-диапазона спектра).

Отклонения	№ точек									Среднее значение по кадру	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
p_x , мм	0,080	0,070	0,075	0,075	0,060	0,070	0,085	0,070	0,075	0,073	
p_y , мм	0,090	0,075	0,085	0,080	0,065	0,070	0,090	0,080	0,085	0,080	
$\pm\psi_\alpha$	мкрад	7,0	4,7	6,3	5,5	3,1	3,9	7,0	5,5	6,3	5,5
	угл.с	1,4	0,9	1,3	1,1	0,6	0,8	1,4	1,1	1,3	1,1
$\pm\psi_\beta$	мкрад	5,5	3,9	4,7	4,7	2,3	3,9	6,3	3,9	4,7	4,4
	угл.с	1,1	0,8	0,9	0,9	0,5	0,8	1,3	0,8	0,9	0,9

Макроискажения растрового изображения при двухкоординатном сканировании с использованием одного плоского СЗ обусловлены тем, что углы отклонения визирного луча O_0O от средней плоскости ($O_0-O-IV-VI$) кадра (см. рис.1) в углах кадра (т.т. I, III, VII, IX) не равны между собой и определяются зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} \sin a_{I,VII} &= \sin 2\beta \cos^2 \alpha \cos i_0 + \sin 2\alpha \sin \beta \sin i_0, \\ \sin a_{III,IX} &= \sin 2\beta \cos^2 \alpha \cos i_0 - \sin 2\alpha \sin \beta \sin i_0, \end{aligned} \right\}$$

где i_0 - угол между нормалью к СЗ в среднем положении ($\alpha = 0, \beta = 0$) и оптической осью объектива телескопа.

При этом визирный луч в основаниях растра, ограниченных точками I, IV, VII и III, VI, IX, смещается по дугам на углы b_{IV} и b_{VI} , определяемыми зависимостью:

$$\cos [2(i_0 \pm \alpha) + b] = \frac{\cos 2i}{\cos \alpha} .$$

В середине кадра соответствующие зависимости имеют вид:

$$\begin{aligned} \sin a_{II} &= \sin a_{IIX} = \sin 2\beta \cos i_0 ; \\ \sin b_V &= \sin^2 \beta \sin 2i_0 . \end{aligned}$$

Таким образом, вместо квадратного (прямоугольного) поля (растра) просмотра в предметной плоскости XOY в фокальной плоскости $X'OY'$ объектива телескопа O_T формируется изображение фигуры с ограничивающими точками I, II, III, ... IX, форма которой напоминает «сноп» или «веер» с дугообразными основаниями I-IV-VII и III-VI-IX и криволинейными боковыми сторонами I-II-III и VII-VIII-IX. Искажения изображения приводят к тому, что сканы просмотра в плоскости XOY , образуемые (в обратном ходе лучей) изображениями фотоприемников ФПУ, на положительной полуплоскости по оси OY перенакладываются между собой, а на отрицательной – расходятся, что приводит помимо геометрических искажений к фотометрическим ошибкам ТСП. Существенное влияние на фотометрическую погрешность имеет конфигурация самого скана (расположением фотоприемников в многоэлементном ФПУ). В работе [2] проведен сравнительный анализ влияния на указанные погрешности двух вариантов скана: линейного ЛС (линейки) и центрально-симметричного ЦСС, используемого в ТСП КА «Электро». Показано, что для ЦСС помимо расходимости и переналожения между крайними строками соседних сканов имеются переналожения строк, образуемых элементами 4 и 5 ФПУ (см. рис.1), т.е. внутри скана, вследствие поворота изображения [6]. Для ЛС такие искажения (внутри скана) практически отсутствуют. Максимальное переналожение двух соседних сканов происходит в углах кадра (т. III, IX): для ЦСС оно превосходит размер пиксела, т.е. строки соседних сканов полностью перекрываются; для ЛС перекрытие составляет примерно половину строки. Кроме того, для ЦСС происходит практически полное перекрытие строк, образуемых элементами 4 и 5 ФПУ, в точках I, II, III, VII, VIII, IX кадра. Таким образом, при использовании в ТСП многоэлементного ФПУ и БСКР с одним плоским СЗ для устранения переналожения строк внутри скана следует использовать одномерную линейную конфигурацию (линейку) элементов в ФПУ. При этом возможна коррекция растра, обеспечивающая параллельность строк растра без переналожения

сканов [2]. В кусочно-линейном приближении корректирующая поправка к законам движения СЗ описывается выражением:

$$\Delta\beta(\alpha, \beta) = -\alpha\beta [\operatorname{tg} i_0 \pm 0,828 \alpha_{\max} (1 - \operatorname{tg}^2 i_0)]. \quad (3)$$

Знак «+» в скобках действует при $\alpha > 0$, знак «-» – при $\alpha < 0$. При введении в законы движения СЗ поправок по уравнению (3) для заданных значений α , β и $i_0 = 40^\circ$ относительная погрешность стыковки строк растра по ширине для ЛС не превышает 3,5% для максимальных значений углов сканирования.

Заключение

1. Исследование метрологических характеристик БСКР путем расчетного анализа и экспериментальной проверки систематических погрешностей с использованием стандартных измерительных средств и КПА [1,3] и экспериментальные исследования случайных ошибок в рабочем режиме БСКР с использованием фоторегистратора показало, что заданные метрологические характеристики БСКР надежно выполняются.

2. Имеющиеся геометрические и фотометрические искажения растрового изображения в VIS-диапазоне спектра ТСП при использовании многоэлементного ФПУ с Z-образной конфигурацией элементов, образующей ЦСС, достаточно существенны и достигают значений, превышающих размер пиксела (ширины строки), по краям кадра в виде перекрытия строк соседних сканов и внутри сканов.

3. Вышеуказанные искажения растра могут быть устранены при использовании в ТСП линейного многоэлементного ФПУ (линейки) путем введения корректирующей поправки в закон движения СЗ, кусочно-линейный вид которой по уравнению (3) обеспечивает относительную погрешность стыковки строк растра не более 3,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прецизионный электропривод с интерферометрическим измерителем перемещений и цифровым программным управлением / Вевюрко И.А., Медушев С.В., Ремизов В.Е., Стома С.А. // Труды ВНИИЭМ. М.: 1985. Т.78.
2. Анализ структуры растра в многолучевой схеме сканирующего устройства / Кавторов В.В., Шичков В.В. // Оптико-механическая промышленность. 1985. №11.
3. Интерферометрический измеритель угловых перемещений/Вевюрко И.А., Ракитянский И.В., Ремизов В.Е., Шичков В.В.//Труды ВНИИЭМ. М.: 1985. Т.78.
4. А.с. 1136095 (СССР). Устройство сканирования/Вевюрко И.А., Шичков В.В., Кавторов В.В., Ремизов В.Е. // Оpubл. в Б.И., 1985. №3.
5. Погрешности измерений / Рабинович С.Г. // Л.: Энергия.1978.
6. Оптические юстировочные задачи /Погарев Г.В.//Л.: Машиностроение. 1974.