

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ НЕРАССТРАИВАЕМЫХ СКАНЕРОВ

© 2009 г. А. Я. Гебгарт, канд. техн. наук

НПП “Геофизика – Космос”, Москва

E-mail: yanuch2003@inbox.ru

В статье проводится сравнительный анализ стабильности углового положения сканирующего пучка на выходе сканеров, обладающих свойством практической нерасстраиваемости: сканеров на основе преломляющего клина и нерасстраиваемых безабберационных сканеров. На основе полученных аналитических выражений показано преимущество нерасстраиваемых безабберационных сканеров.

Коды OCIS: 120.4570, 220.4830.

Поступила в редакцию 02.09.2008.

### Введение

Оптико-механические сканирующие системы используются в ряде оптических и оптико-электронных измерительных приборов наземной и космической техники [1–4]. При разработке этих приборов для достижения требуемой точности необходимо обеспечить высокую стабильность углового положения сканирующего пучка. Это часто достигается за счет применения прецизионных осевых систем. Еще одним путем обеспечения высокой стабильности сканирующего пучка при углах отклонения до  $10^\circ$  является применение афокальных нерасстраиваемых сканеров, работающих в параллельных пучках лучей [5–8], в которых не требуется применения прецизионных осевых систем. Высокая угловая стабильность пучка реализуется автоматически за счет практической нерасстраиваемости сканеров, то есть нечувствительности углового положения сканирующего (отклоненного) пучка к микронаклонам сканера, вызываемым биением оси вращения. Очевидно, что при использовании таких систем требования к указанному биению могут быть существенно снижены. К нерасстраиваемым сканерам относятся сканирующие системы на основе преломляющего клина – клиновые сканеры (рис. 1, 2) и нерасстраиваемые безабберационные сканеры (НБ-сканеры) (рис. 3–5) как с конической траекторией сканирования, так и построенные на их основе сканеры с более сложными траекториями сканирования. Формирование отклоненного пучка в преломляющем клине обеспечивается за счет угла между преломляющими гранями, в НБ-сканере – за счет угла между зеркальными гранями. Практическая нерасстраиваемость указанных систем обеспечивается за счет взаимной компенсации влияния микронаклонов элементов сканера на угловое положение сканирующего пучка. Эта компенсация осуществляется

– для клиновых сканеров при преломлении на гранях вращающегося клина [5, 9],

– для НБ-сканеров при отражении от четного числа жестко связанных с помощью моноблочных стеклянных конструкций вращающихся зеркальных поверхностей и при выполнении условий нерасстраиваемости [5–7].

НБ-сканеры в отличие от клиновых сканеров, обладающих хроматизмом, формируют безабберационное качество изображения. Это достигается за счет использования плоских зеркал и зеркально-призмных элементов, разворачивающихся в плоскопараллельную пластину. НБ-сканеры по сравнению с клиновыми сканерами обладают большими габаритами.

В практике проектирования нерасстраиваемых сканеров наибольшее применение находят схемы построения, в которых ось падающего пучка параллельна оси вращения сканера (рис. 1–5). По сравнению со схемами с наклонным падением пучка данные схемы отличаются меньшими габаритами, неискаженной круговой траекторией сканирования и более высокой стабильностью [7, 10, 11].

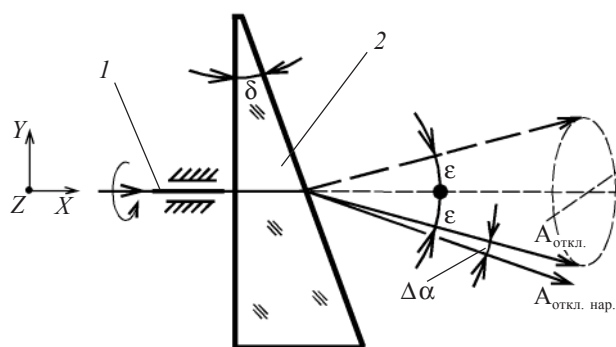


Рис. 1. Клиновой сканер. 1 – ось вращения, 2 – преломляющий клин.

Среди нерасстраиваемых сканеров наиболее известны сканеры, формирующие только отклоненный пучок (однолучевые сканеры) (рис. 1, 3). В преломляющем клине отклоненный пучок формируется при преломлении на гранях клина, в НБ-сканере – при последовательном отражении от зеркал.

Важное место в ряду нерасстраиваемых сканеров занимают сканеры с дополнительным опорным пучком лучей, проходящим систему насквозь без углового отклонения (рис. 2, 4, 5) [5, 6, 7]. Так, например, в клиновом сканере на основе бипризмы с плоской центральной частью (рис. 2) или на основе клина с отверстием, опорный пучок  $A_{оп}$  образуется при прохождении центральной зоны сканера. В НБ-сканере на основе светоделителя и зеркала (рис. 4) опорный пучок  $A_{оп}$  образуется при прохождении светоделителя. Угловое расстояние между от-

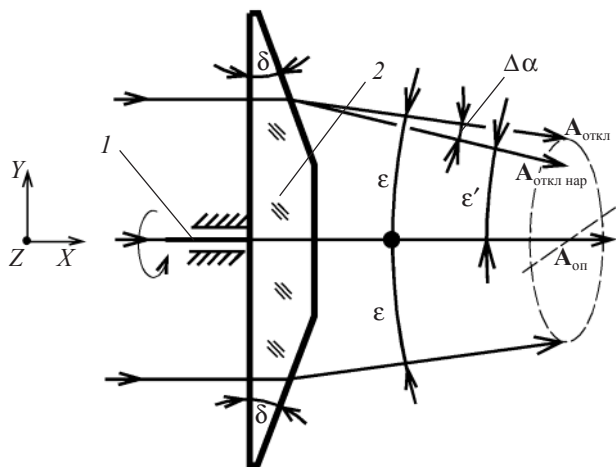


Рис. 2. Сканер с опорным пучком на основе бипризмы с плоской центральной частью. 1 – ось вращения, 2 – бипризма.

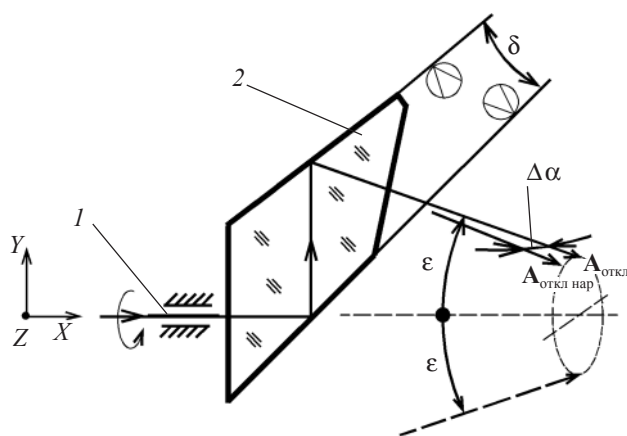


Рис. 3. Зеркально-призменный НБ-сканер. 1 – ось вращения, 2 – зеркально-призменный блок.

клоненным  $A_{откл}$  и опорным  $A_{оп}$  пучками в таких сканерах отличается высокой стабильностью как при микронаклонах сканера относительно падающего пучка, так и при микронаклонах падающего пучка относительно сканера. (В данной работе  $A_{откл}$  – единичный вектор углового положения отклоненного пучка номинальной системы сканера,  $A_{оп}$  – единичный вектор углового положения опорного пучка). Это позволяет в ряде случаев перейти от абсолютных измерений углового положения отклоненного пучка к измерениям относительно опорного пучка, что повышает точность измерений за счет исключения нестабильности углового положения падающего пучка.

В качестве практической реализации сканеров с опорным пучком можно отметить, например, стенд для паспортизации систематических погрешностей и проверки точности углоизмерительных приборов с матричным фотоприемником, созданный на основе НБ-сканера в виде двух светоделителей [7]. В этом стенде (рис. 5) пучок параллельных лучей, выходящий из имитатора точки 1, при прохождении сканирующей (отклоняющей) системы 3, выполненной в виде кварцевого моноблока, разделяется на два пучка – опорный  $A_{оп}$  и отклоненный  $A_{откл}$ . Опорный пучок образуется при прохождении системы насквозь, а отклоненный – при последовательном отражении от двух светоделителей. Отклоняющие системы сменные, с разными углами отклонения. В результате в плоскости фотоприемного устройства испытываемого прибора 4 формируются два изображения точечного источника. Задание угловых положений отклоненного пучка  $A_{откл}$  обеспечивается с помощью поворотного устройства 2 с отсчетной системой. Проверка точности прибора 4 заключается в определении отклонения измеренного прибором углового положения точечного источника от

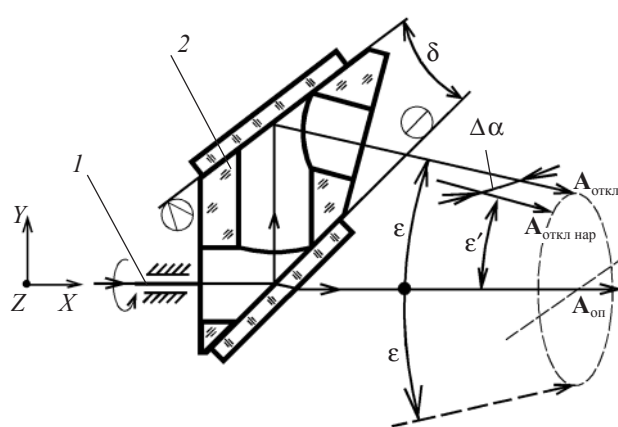
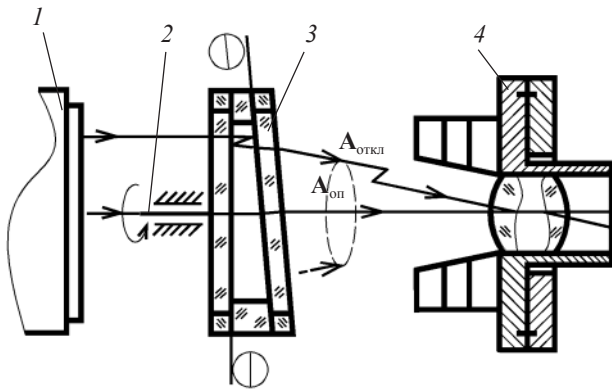


Рис. 4. НБ-сканер с опорным пучком на основе светоделителя и зеркала. 1 – ось вращения, 2 – зеркально-призменный блок.



**Рис. 5.** Стенд для проверки точности углоизмерительного прибора. 1 – имитатор точки, 2 – поворотное устройство, 3 – НБ-сканер с опорным пучком на основе двух светоделителей, 4 – проверяемое изделие.

заданного и известного направления в прямоугольной системе координат посадочной плоскости прибора. Наличие опорного пучка позволяет проводить точностные проверки прибора 4 также сравнением аттестованного углового расстояния между опорным  $A_{оп}$  и отклоненным  $A_{откл}$  пучками на выходе стенда с угловым расстоянием между теми же пучками, измеренным прибором. В этом случае точность стенда повышается, так как практически исключается погрешность за счет нестабильности положения визирной линии имитатора. В работе [12] разработана методика паспортизации дисторсионных искажений прибора с помощью указанной отклоняющей системы. Стенд обеспечивает высокостабильное задание угловых положений точечного источника при высоком качестве формируемого изображения и при отсутствии жестких требований к биению оси вращения отклоняющей системы.

В процессе разработки оптических систем с использованием нерасстраиваемых сканеров встает вопрос о выборе того или иного типа указанных сканеров. Поэтому большой интерес представляет собой проведение полного сравнительного анализа возможностей этих систем в части обеспечения ими стабильности углового положения сканирующего пучка с учетом их конструктивных параметров.

### Сравнительный анализ стабильности нерасстраиваемых сканеров

В соответствии с работой [5] мерой угловой стабильности сканирующей системы при нарушении ее геометрической схемы (микронаклонах) является остаточное угловое отклонение сканирующего пучка от номинальной траектории сканирования

$\alpha = |A_{откл} - A_{откл\ нар}| / |A_{откл}|$ , где  $A_{откл\ нар}$  – единичный вектор углового положения отклоненного пучка системы с нарушенной геометрией

Для сканеров с опорным пучком мерой угловой стабильности, кроме рассмотренной выше, является также остаточное изменение угла между отклоненным и опорным пучками при нарушении геометрии сканера  $\gamma = |\varepsilon - \varepsilon'|$ , где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon'$  – углы между единичными векторами положения отклоненного и опорного пучков соответственно, номинальной системы и системы с нарушенной геометрией. Это изменение угла между отклоненным и опорным пучками  $\gamma$  возникает как из-за микронаклонов сканера относительно падающего пучка, так и из-за микронаклонов падающего пучка относительно сканера. Очевидно, что оба указанных случая нарушения геометрии в этих сканерах при проведении оценки изменения углового расстояния между отклоненным и опорным пучками  $\gamma$  являются равнозначными.

Таким образом, сравнительный анализ нерасстраиваемых сканеров будем проводить для однолучевых сканеров (рис. 1, 3) в виде сравнений максимальных остаточных угловых отклонений  $\alpha_{max}$ , при этом для сканеров с опорным пучком (рис. 2, 4, 5) также и в виде сравнения максимальных остаточных угловых отклонений  $\gamma_{max}$  при одинаковых значениях микронаклонов  $\Delta$ , угле отклонения сканирующего пучка  $\varepsilon$  и угловом поле зрения  $2\omega$  для всех указанных сканеров. Под угловым полем подразумевается мгновенное угловое поле оптической системы, в состав которой входит сканер.

Следует иметь в виду, что при угле отклонения сканирующего пучка  $\varepsilon$  угол  $\delta$  между зеркалами НБ-сканера (угол при вершине эквивалентного углового зеркала) составляет  $\delta = 0,5\varepsilon$ , а угол  $\delta$  при вершине преломляющего клина в рамках данной работы принимается  $\delta \approx \varepsilon / (n - 1)$ , где  $n$  – показатель преломления.

#### Сравнительный анализ стабильности углового положения сканирующего пучка нерасстраиваемых сканеров

Используя приближенные выражения (2.2) из [8] и (2) из [7] и преобразовав их применительно к данной работе, получим выражения максимальных остаточных отклонений сканирующего пучка  $\alpha_{max}$  для нерасстраиваемых сканеров с конической траекторией сканирования, когда ось падающего пучка параллельна оси вращения сканера, в правой системе координат  $XYZ$ , где ось  $X$  параллельна оси падающего пучка, а ось  $Z$  параллельна ребру клина или углового зеркала, эквивалентного НБ-сканеру

для клинового сканера в виде преломляющего клина

$$\alpha_{\text{KCmax}} \approx \frac{\Delta \varepsilon (n+1) [\varepsilon n + 2\omega(n-1)]}{2n(n-1)}, \quad (1)$$

для НБ-сканера

$$\alpha_{\text{НБmax}} \approx 0,5\Delta\varepsilon^2 + \Delta\varepsilon\omega. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) углы выражены в радианах.

Следует отметить, что максимальное остаточное отклонение  $\alpha_{\text{max}}$  для

– клинового сканера вызывается его микронаклонами  $\Delta = \Delta_z$  вокруг оси  $Z$ , происходит в плоскости главного сечения клина  $YX$  (рис. 1 и 2);

– НБ-сканера вызывается его микронаклонами  $\Delta = \Delta_y$  вокруг оси  $Y$ , происходит в направлении, параллельном ребру углового зеркала, эквивалентно го безабберационному сканеру.

Для проведения сравнительного анализа стабильности указанных нерасстраиваемых сканеров составим отношение выражений (1) и (2), которое будет являться мерой их сравнительной оценки. После преобразований будет иметь

$$K = \frac{\alpha_{\text{KCmax}}}{\alpha_{\text{НБmax}}} \approx \frac{\left(\frac{n+1}{n-1}\right) + 2(\omega/\varepsilon) \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{1 + 2(\omega/\varepsilon)}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что

– значение коэффициента  $K$  зависит от отношения углового поля к углу отклонения  $\omega/\varepsilon$ , показателя преломления материала клина  $n$  и практически не зависит от микронаклонов  $\Delta$ ,

– коэффициент  $K$  при существующих марках стекол и оптических материалов ( $n \approx 1,47 - 4$ ) в интервале  $0 < \omega/\varepsilon < \infty$  является монотонно убывающей функцией. Границы области значений коэффициента  $K$

$$K_1 = \lim_{(\omega/\varepsilon) \rightarrow 0} \frac{\left(\frac{n+1}{n-1}\right) + 2(\omega/\varepsilon) \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{1 + 2(\omega/\varepsilon)} = 1 + \frac{2}{n-1}, \quad (4)$$

$$K_2 = \lim_{(\omega/\varepsilon) \rightarrow \infty} \frac{\left(\frac{n+1}{n-1}\right) + 2(\omega/\varepsilon) \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{1 + 2(\omega/\varepsilon)} = 1 + 1/n. \quad (5)$$

При  $0 < \omega/\varepsilon < \infty$   $1 + 1/n < K < 1 + 2/(n-1)$  и, следовательно, при  $n \approx 1,47 - 4$   $K > 1$ .

Из анализа выражений (4) и (5) следует, что коэффициент  $K$  принимает наибольшие значения (а система НБ-сканера обладает наибольшей стабильностью по сравнению с клиновым сканером) при малых значениях отношения  $\omega/\varepsilon$  и показателя преломления клинового сканера  $n$ . То есть

$$K_{\text{max}} = 1 + 2(n_{\text{min}} - 1). \quad (6)$$

Следует особо отметить, что малым значениям отношения  $\omega/\varepsilon$  при фиксированных значениях угла отклонения  $\varepsilon$ , не превышающего нескольких градусов, соответствуют малые угловые поля  $2\omega$ . Можно показать, что при  $n_{\text{min}} = 1,47$  (кварцевое стекло)  $K_{\text{max}} = 5,255$ . Малыми показателями преломления обладают кварцевые и бесцветные стекла, составляющие наибольшую долю в номенклатуре существующих стекол и широко используемые в спектральном диапазоне  $\lambda \approx 0,4 \mu\text{м} - 1,1 \mu\text{м}$ . Этот случай (малое угловое поле  $2\omega$  и спектральный диапазон  $\lambda \approx 0,4 \mu\text{м} - 1,1 \mu\text{м}$ ) достаточно часто встречается в практике проектирования оптико-электронных приборов.

С ростом отношения  $\omega/\varepsilon$  и показателя преломления клинового сканера  $K$  уменьшается и преимущество НБ-сканера несколько снижается. В этом случае

$$K_{\text{min}} = 1 + 1/n_{\text{max}}. \quad (7)$$

Можно показать, что при  $n_{\text{max}} = 4$  (германий)  $K_{\text{min}} = 1,25$ . Большими показателями преломления обладают, как правило, материалы, предназначенные для работы в ИК области.

Результаты расчета остаточных отклонений  $\alpha_{\text{max}}$  и коэффициента  $K$ , проведенные соответственно по формулам (1), (2) и (3) для  $\omega/\varepsilon = 0, 1, 5$ ,  $n = 1,5, 4$  и  $\Delta = 1'$ ,  $\Delta = 0,5'$  приведены в таблице. Также был проведен расчет указанных величин для этих же параметров сканеров с помощью специализированной оптической программы “Zemax”. Разница в результатах расчета коэффициента  $K$ , полученных по формуле (3) и с помощью программы “Zemax”, не превышает 7%. Это подтверждает возможность практического использования полученных результатов.

Таким образом, НБ-сканеры по сравнению с клиновыми сканерами отличаются более высокой стабильностью углового положения сканирующего пучка.

#### *Сравнительный анализ стабильности нерасстраиваемых сканеров с опорным пучком лучей*

Для сканеров с опорным пучком все преимущества в стабильности НБ-сканеров по сравнению с клиновыми сканерами в отношении углового положения сканирующего пучка сохраняются.

Для клинового сканера с опорным пучком (рис. 2) максимальное изменение угла между опорным пучком, не изменяющим свое угловое положение в пространстве, и соответствующим отклоненным пучком ( $\gamma_{\text{KCmax}}$ ) вызывается микронаклонами  $\Delta_z$  сканера вокруг оси  $Z$ , происходит в плоскости его главного сечения  $XOY$  и, следовательно,  $\gamma_{\text{KCmax}} = \alpha_{\text{KCmax}}$ . То есть величина  $\gamma_{\text{KCmax}}$  определяется выражением (1).

Расчетные данные коэффициентов  $K$  в зависимости от параметров сканеров

$\omega \epsilon$	Угловое поле $\omega$ , угл. град.	Угловое поле $\epsilon$ , угл. град.	$\Delta$ , угл. мин.	Показатель преломления клиновидного сканера, $n$	$\alpha_{\max}$ , угл. сек.		$K$ по формуле (3)	
					$\alpha_{\text{КСmax}}$ по формуле (1)	$\alpha_{\text{НБmax}}$ по формуле (2)		
0	0		1	1,5	0,183	0,036	5	
			4	0,061		1,67		
			0,5	1,5	0,091	0,018	5	
			4	0,031		1,67		
			1	1,5	1,142	0,228	5	
			4	0,381		1,67		
1	1	1	0,5	1,5	0,571	0,114	5	
			4	0,190		1,67		
			1	1,5	0,076	0,027	2,78	
			4	0,038		1,39		
			0,5	1,5	0,038	0,014	2,78	
			4	0,019		1,39		
	5	5	5	1	1,5	1,904	0,685	2,78
				4	0,952		1,39	
				0,5	1,5	0,952	0,342	2,78
				4	0,476		1,39	
				1	1,5	0,198	0,100	1,97
				4	0,129		1,29	
5	5	1	0,5	1,5	0,099	0,050	1,97	
			4	0,065		1,29		
			1	1,5	0,792	0,402	1,97	
			4	0,518		1,29		
			0,5	1,5	0,396	0,201	1,97	
			4	0,259		1,29		

Для НБ-сканера с опорным пучком максимальное изменение угла между отклоненным и опорным пучками ( $\gamma_{\text{НБmax}}$ ) вызывается микронаклонами  $\Delta_y$  сканера вокруг оси  $Y$ . Однако в этом случае, как показал предварительный анализ, необходимо учитывать не только максимальное угловое смещение отклоненного пучка  $\alpha_{\text{НБmax}}$  в направлении ребра эквивалентного углового зеркала, но и угловое смещение отклоненного пучка в направлении, параллельном оси  $Y$ , являющееся величиной второго порядка малости относительно величины  $\alpha_{\text{НБmax}}$ . Поэтому для нахождения указанного угла  $\alpha_{\text{НБmax}}$  следует иметь более точное выражение углового положения отклоненного пучка.

Используя выражение (III-41) из [9] и преобразовав его применительно к данной работе, получим для рассматриваемой системы с нарушенной геометрией выражение единичного вектора положения отклоненного луча

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{откл нар}} \approx & [\cos(\epsilon + \omega) + 0,25 \Delta^2 \sin 2\epsilon \sin(\epsilon + \omega)]\mathbf{i} + \\ & + [\sin(\epsilon + \omega) - 0,25 \Delta^2 \sin 2\epsilon \cos(\epsilon + \omega)]\mathbf{j} + \\ & + [2\Delta \sin 0,5\epsilon \sin(0,5\epsilon + \omega)]\mathbf{k}. \end{aligned} \quad (8)$$

Единичный вектор положения соответствующего опорного луча, прошедшего рассматриваемую систему без отклонения, определится выражением

$$\mathbf{A}_{\text{оп}} = \cos \omega \mathbf{i} + \sin \omega \mathbf{j}. \quad (9)$$

Тогда для угла  $\epsilon'$  между указанными векторами будем иметь

$$\cos \epsilon' \approx \cos \epsilon - 0,25 \Delta^2 \sin 2\epsilon \sin \epsilon. \quad (10)$$

С учетом того, что  $\gamma = |\epsilon' - \epsilon|$ , получим

$$\gamma_{\text{НБmax}} \approx 0,5 \Delta^2 \epsilon. \quad (11)$$

В выражении (11) углы выражены в радианах.

Из выражения (11) следует, что для НБ-сканеров в отличие от клиновых сканеров изменение угла между опорным и отклоненным пучками  $\gamma_{\text{НБmax}}$  при нарушении геометрии этих систем существенно меньше, так как составляет величину второго порядка малости относительно микронаклонов  $\Delta$  и практически не зависит от углового поля  $2\omega$ . То есть и в случае с опорным пучком НБ-сканеры существенно менее чувствительны к нарушению геометрии, чем системы на основе преломляющего клина, и отличаются от них

более высокой стабильностью угла между опорным и отклоненным пучками.

Для более детального сравнительного анализа этих систем составим отношение  $\gamma_{\text{КСmax}}/\gamma_{\text{НБmax}}$

$$T = \gamma_{\text{КСmax}}/\gamma_{\text{НБmax}} = \frac{(n+1)\varepsilon}{(n-1)\Delta} + \frac{2(n+1)}{n}(\omega/\Delta). \quad (12)$$

Анализ выражения (12) показывает, что коэффициент  $T$  зависит от значений отношений  $\varepsilon/\Delta$  и  $\omega/\Delta$ , а также от показателя преломления.

Для существующей номенклатуры преломляющих материалов показатель их преломления находится в пределах  $1,47 \leq n \leq 4$ . Следовательно, выражение (12) может быть представлено в виде

$$T \approx (1,67 - 5,25)(\varepsilon/\Delta) + (2,5 - 3,36)(\omega/\Delta). \quad (13)$$

Как уже указывалось ранее, в рассматриваемых системах угол отклонения  $\varepsilon$  имеет значение порядка единиц градусов, а значения микронаклонов  $\Delta$ , как правило, не превышают единиц минут. То есть при  $\varepsilon/\Delta \gg 60$  и  $1,47 \leq n \leq 4$  коэффициент  $T > 100$ .

Дальнейший анализ выражения (13) не представляет практического интереса, так как преимущество НБ-сканеров перед сканерами на основе преломляющего клина в части обеспечения стабильности угла между выходящими пучками очевидно.

## Выводы

Сравнительный анализ нерасстраиваемых сканеров в части обеспечения ими стабильности углового положения сканирующего пучка с учетом их конструктивных параметров показывает, что нерасстраиваемые безабберационные сканеры по сравнению со сканерами на основе преломляющего клина отличаются более высокой стабильностью. Повышение стабильности углового положения сканирующего пучка по сравнению с клиновыми сканерами в диапазоне изменений отношения  $0 < \omega/\varepsilon < \infty$  и существующей номенклатуры стекол клиньев ( $n = 1,47 - 4$ ) составляет от 5,255 до 1,25 раз.

Для систем с опорным пучком все преимущества, отнесенные к сканирующему (отклоненному) пучку, сохраняются. Преимущество в стабильности

угла между опорным и отклоненным пучками для указанных сканеров по сравнению с клиновыми сканерами при нарушении их геометрии составляет сотни и более раз.

Полученные результаты дают возможность обеспечить оптимальный выбор сканирующей (отклоняющей) системы и ее параметров при разработке ряда оптических и оптико-электронных приборов повышенной точности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2004. 470 с.
2. Кузьмин В.С., Федосеев В.И. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: опыт разработки, проблемы и тенденции // Оптический журнал. 1996. № 7. С. 4–9.
3. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: М.: Логос, 2007. 247 с.
4. Величко А.П., Гарипов В.К., Слепцов В.В., Шишков П.О. Системы дистанционного контроля параметров окружающей среды (атмосферы) на основе ИК-радиометрии. М.: Машиностроение-1, 2007. 473 с.
5. Колосов М.П. Оптика адаптивных угломеров. М.: ООО СКАН-1, 1997. 412 с.
6. Гебгарт А.Я., Колосов М.П. Анализ нерасстраиваемых оптических систем афокальных сканеров // Оптический журнал. 1998 Т. 65. № 8. С. 66–70.
7. Гебгарт А.Я. Разработка афокальных нерасстраиваемых безабберационных оптико-механических сканирующих систем // Автореферат канд. дис. М.: изд-во МГУТиК, 2004.
8. Шейнис Н.В. Афокальные угломерные сканеры // ОМП. 1987. № 1. С. 51–53.
9. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1966. 292 с.
10. Голубовский Ю.М., Куликова И.И. Об отклонении луча вращающимся клином // ОМП. 1974. № 4. С. 21–23.
11. Голубовский Ю.М. Приближенная формула расчета угла отклонения клина // ОМП. 1978. № 4. С. 69–70.
12. Карелин А.Ю. Повышение точности астроизмерительных широкопольных приборов с ПЗС матрицей // Оптический журнал. 1998. № 8. Т. 65. С. 46–50.