

# ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.1.158804

УДК 621.7.08

Т.Н. Генсицкая<sup>1</sup>, Т.И. Гураль<sup>1</sup>, В.М. Тягур<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Казенное предприятие специального приборостроения “Арсенал”, Киев, Украина

<sup>2</sup>КПИ им. Игоря Сикорского, Киев, Украина

\*corresponding author: zhivkovalex@gmail.com

## МЕТОД КАЛИБРОВКИ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СКАНЕРОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

**Проблематика.** В процессе изготовления сканера дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) одним из наиболее ответственных этапов является его калибровка. Поэтому задача разработки высокоточного метода определения угловых параметров сканера, математического алгоритма обработки данных и схемного решения соответствующей аппаратуры является весьма актуальной.

**Цель исследования.** Разработка методики калибровки, математического алгоритма обработки данных и схемного решения соответствующего метрологического оборудования для сканера ДЗЗ.

**Методика реализации.** Предложен метод калибровки положения визирных осей фотоприемных линеек сканера относительно его контрольного элемента на основе использования коллимационного измерительного комплекса. При этом изображение треугольной марки, генерируемое коллиматором аппаратуры на бесконечности, строится одновременно на фотоприемных линейках сканера и в плоскости анализа фотоэлектрического автоколлиматора. Фотоэлектрический автоколлиматор регистрирует угловое положение марки относительно нормали к плоскости контрольного элемента сканера.

**Результаты исследования.** Разработаны методика наземной предполетной калибровки угловых параметров сканера ДЗЗ, математический алгоритм обработки данных и схемное решение соответствующего метрологического оборудования.

**Выводы.** Предложена методика калибровки сканера ДЗЗ с несколькими линейными приемниками изображения, разработано схемное решение соответствующего метрологического оборудования на базе стенда контроля модуляционной передаточной функции сканера. Показана возможность измерения положения визирных осей фотоприемных линеек сканера относительно его контрольного элемента в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Проведено математическое моделирование, и обоснована возможность реализации предложенного метода.

**Ключевые слова:** коллимационный измерительный комплекс; сканер дистанционного зондирования Земли; угловые параметры.

### Введение

Современный уровень разработки и производства сканеров дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с линейными приемниками изображения выдвигает достаточно жесткие требования к их калибровке, поскольку это напрямую связано с достоверностью получаемой информации. Калибровка параметров сканера производится как непосредственно после сборки и проведения всех циклов его испытаний [1–3], так и в процессе его работы на орбите [4, 5].

В процессе преобразования оптической информации оптико-электронным трактом сканера возникают неизбежные искажения, обусловленные погрешностями изготовления элементов и сборки, в частности из-за отклонения от радиальной симметрии и децентрировки линз объектива. Поэтому актуальным является вопрос разработки методики калибровки и соответствующего метрологического оборудова-

ния, обеспечивающих достаточно высокую точность калибровки. Данное оборудование является весьма дорогостоящим, в связи с чем при его разработке целесообразно объединять измерение функционально связанных характеристик и дополнительно к калибровке угловых параметров производить контроль модуляционной передаточной функции [6, 7] объектива и сканера ДЗЗ в сборе. Основным элементом подобных измерительных схем является оптический коллиматор [8].

Калибровка сканера заключается в определении углового положения визирных лучей элементов фотоприемных линеек в пространстве предметов относительно нормали к грани его контрольного элемента сканера.

### Постановка задачи

Данная статья посвящена процессу наземной предполетной калибровки сканера. Целью

работы является разработка методики калибровки, математического алгоритма обработки данных и соответствующего метрологического оборудования.

**Особенности измерительной схемы**

Для обеспечения достаточно большого поля зрения (захвата) сканера в плоскости его изображения устанавливается несколько фотоприемных линеек. Система фотоприемных линеек является жесткой структурой, поэтому для решения задачи калибровки взаимного положения фотоприемных линеек и контрольного элемента сканера достаточно определить соответствующее угловое положение краевых зон фотоприемных линеек.

На рис. 1 схематично показаны сканер ДЗЗ и угловые размеры, подлежащие калибровке. Сканер (рис. 1, а) имеет четыре фотоприемные линейки (рис. 1, б), расположенные в его фокальной плоскости в шахматном порядке с зонами переналожения пикселей  $\Delta L$ . Контрольный элемент, выполненный в виде

отражающей многогранной призмы (МП), неподвижно закреплен на корпусе сканера. Визирные оси (ВО) светочувствительных элементов фотоприемных линеек проходят через центр входного зрачка объектива и центр соответствующего пикселя линейки.

Целью калибровки является определение следующих параметров:

- 1) значения углов между нормальными к “нулевой” грани МП сканера и положениями визирной оси, соответствующими краям фотоприемных линеек сканера  $\gamma$ ;
- 3) углового расстояния между продольными осями фотоприемных линеек  $\varphi$ ;
- 4) углового отклонения продольных осей фотоприемных линеек относительно их номинального расположения  $\omega$ .

Для реализации предлагаемого метода калибровки был разработан коллимационный измерительный комплекс, схема которого представлена на рис. 2. Основным блоком комплекса является коллиматор, который включает в себя блок тест-объекта, состоящий из осветителя 1, марки 2 и зеркала 3, и зеркальный

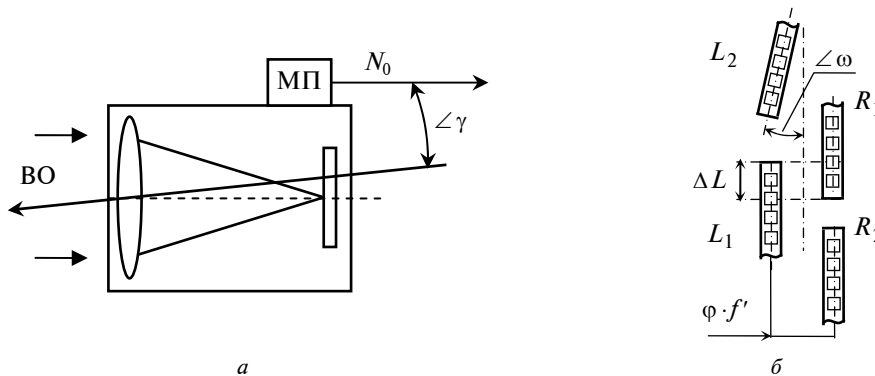


Рис. 1. Параметры сканера, подлежащие калибровке: а – схема определения угла  $\gamma$ ; б – расположение фотоприемных линеек в фокальной плоскости объектива сканера, где  $f'$  – фокусное расстояние объектива сканера

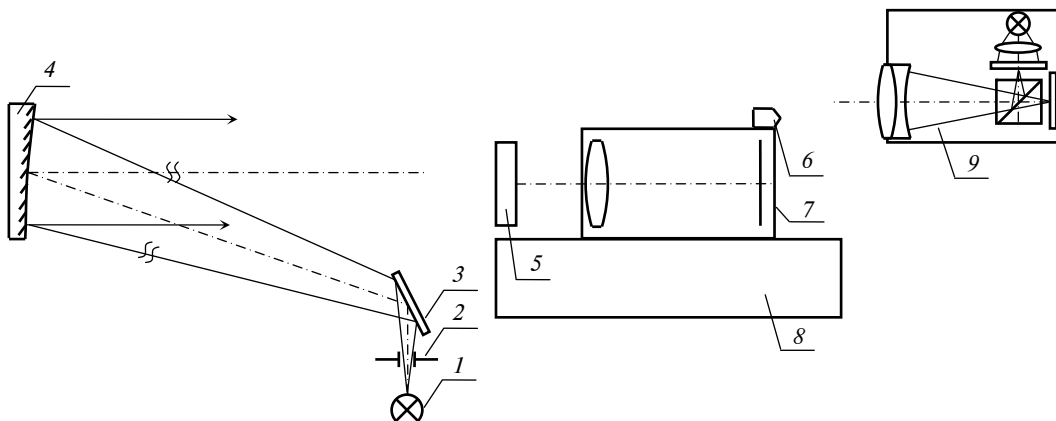


Рис. 2. Оптическая схема коллимационного измерительного комплекса

объектив, выполненный в виде внеосевой параболы 4. Марка 2 тест-объекта, устанавливаемая в фокальной плоскости объектива коллиматора, имеет непрозрачный прямоугольный сегмент окружности, на котором расположено прозрачное перекрестие (рис. 3, а). Подсветка марки осуществляется с помощью осветителя, в состав которого входит галогенная лампа накаливания и конденсор (на рисунке не показан). Зеркало служит для поворота светового пучка. Параллельный пучок света, формируемый объективом коллиматора, пройдя оптический клин 5, попадает в объектив контролируемого сканера 7, на корпусе которого неподвижно закреплена МП б.

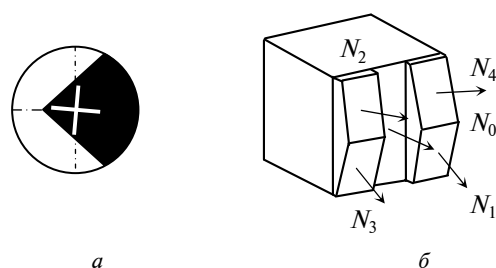


Рис. 3. Основные оптические элементы схемы измерения: а – марка тест-объекта; б – многогранная призма

Сканер расположен на основании 8, которое имеет возможность поворота вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Наклон сканера вокруг горизонтальной оси позволяет получить изображение марки коллиматора в требуемой зоне плоскости изображения сканера вдоль фотоприемных линеек. Поворот вокруг вертикальной оси служит для первоначальной установки сканера относительно оси визирования коллиматора в горизонтальной плоскости. Измерительный фотоэлектрический автоколлиматор (ФАК) 9 расположен таким образом, что в верхнюю часть его входного зрачка попадает световой пучок коллиматора, а в нижней части поля зрения находится МП сканера.

МП сканера на стороне, обращенной в сторону ФАК, имеет пять отражающих граней (рис. 3, б). Углы между нормальными центральной “нулевой”  $N_0$  и боковых граней  $N_i$  МП соответствуют углам между “нулевой” визирной осью сканера и визирными осями, проходящими через краевые зоны фотоприемных линеек. Оптический клин 5 имеет возможность поворота на  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси. В зависимости от положения клина объектив сканера строит изображение марки коллиматора

либо на левых, либо на правых фотоприемных линейках.

### Методика проведения калибровки

В процессе проведения калибровки осуществляется “привязка” краевых зон фотоприемных линеек и нормалей к граням МП. Оптический клин устанавливается таким образом, чтобы световой пучок коллиматора отклонялся в сторону левой фотоприемной линейки сканера. После этого наклоном и поворотом подвижного основания сканера устанавливается так, чтобы изображение марки коллиматора строилось на краю его левой центральной линейки (см. рис. 1, б). Пиксель фотоприемной линейки, лежащий на биссектрисе прямого угла изображения сегмента окружности марки, принимается за начало отсчета. Затем подвижное основание со сканером наклоняется вокруг горизонтальной оси и поочередно устанавливается в четыре положения, соответствующие четырем краевым зонам фотоприемных линеек. В каждом из положений сканера оптический клин устанавливается так, чтобы поочередно “привязать” изображение марки коллиматора к левой и правой фотоприемным линейкам.

Для каждого положения сканера на фотоприемной матрице ФАК определяются координаты автоколлимационного блика от соответствующей грани МП и координаты изображения центра перекрестия марки коллиматора.

Поскольку ось визирования ФАК не совпадает с центром матрицы, перед началом измерений необходимо определить ее положение. Схема измерения и условное расположение марок коллиматора и ФАК в плоскости фотоприемной матрицы приведены на рис. 4. Для определения положения оси визирования ФАК (рис. 4, а) перед его объективом устанавливается уголкового отражателя 1, который отражает падающий световой пучок строго в обратном направлении, и регистрируются координаты центра изображения перекрестия марки – точка  $b_k$  (рис. 4, б). Затем уголкового отражателя выводится из светового пучка ФАК, и в поле его зрения одновременно попадают световой пучок коллиматора и автоколлимационный блик от “нулевой” грани МП, соответственно в плоскости матричного приемника ФАК одновременно строятся изображение марки коллиматора и изображение автоколлимационного блика ФАК. На рис. 4, б точка  $b_k(x_k, y_k)$  соответствует центру перекрестия изображения марки

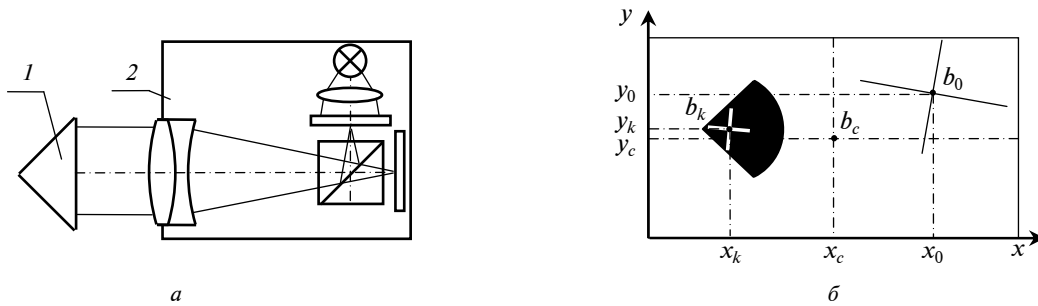


Рис. 4. Схема определения положения оси визирования и система координат фотоэлектрического автоколлиматора (ФАК): а – определение угловых координат положения оси визирования ФАК; б – координаты марок коллиматора и ФАК в плоскости фотоприемной матрицы ФАК

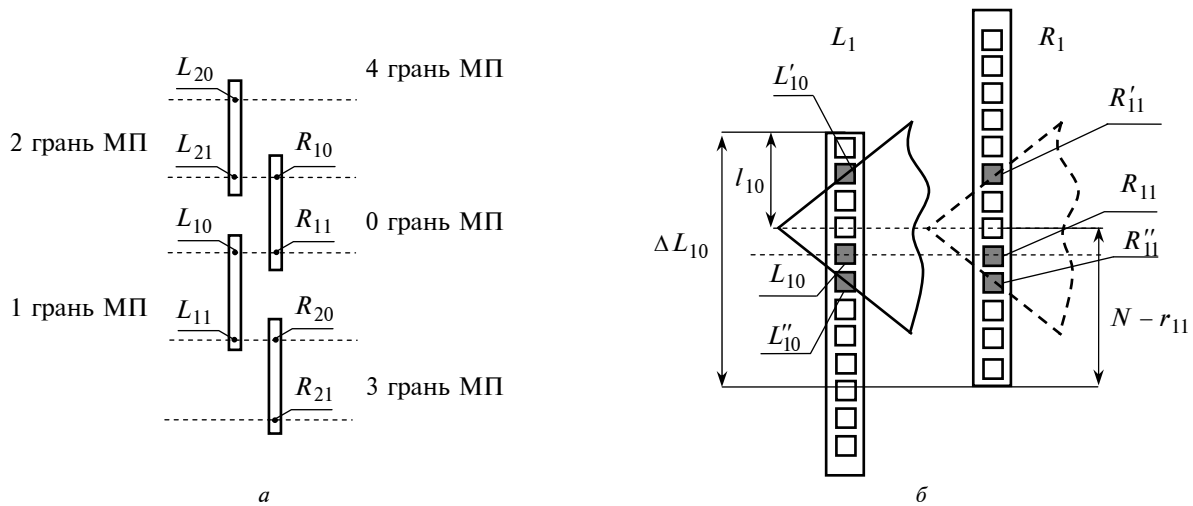


Рис. 5. Схема расположения фотоприемных линеек: а – схема обозначения зон измерения фотоприемных линеек сканера и соответствующих граней МП; б – изображения марки тест-объекта коллиматора в зоне переналожения смежных линеек

коллиматора, точки  $b_0(x_0, y_0)$  – центру автоколлимационного изображения марки ФАК, полученного от “нулевой” грани МП.

По полученным координатам точек рассчитываются угловое положение проекции нормали к “нулевой” грани МП относительно визирной оси ФАК в горизонтальной и вертикальной плоскостях по формулам

$$\alpha_{0x} = \frac{x_0 - x_c}{2f'_{\text{ФАК}}} \cdot P_{\text{ФАК}};$$

$$\alpha_{0y} = \frac{y_0 - y_c}{2f'_{\text{ФАК}}} \cdot P_{\text{ФАК}},$$

где  $P_{\text{ФАК}}$  – размер пикселя матрицы ФАК,  $f'_{\text{ФАК}}$  – фокусное расстояние ФАК, а также составляющие угла между осью визирования коллиматора, проходящей через центр перекрестия его треугольной марки, и осью визирования ФАК по формулам

$$\beta_{kx} = \frac{x_k - x_c}{f'_{\text{ФАК}}} \cdot P_{\text{ФАК}};$$

$$\beta_{ky} = \frac{y_k - y_c}{f'_{\text{ФАК}}} \cdot P_{\text{ФАК}}.$$

Для того чтобы связать визирные оси смежных фотоприемных линеек сканера, оптический клин поочередно устанавливается в два положения, повернутых на  $180^\circ$ . В первом положении изображение марки коллиматора строится на левой линейке, во втором – на правой. Схематическое изображение фотоприемных линеек и изображения марки коллиматора показаны на рис. 5. На границах треугольной зоны изображения марки левой центральной линейки (рис. 5, б) снимаются два отсчета  $L'_{10}$  и  $L''_{10}$ , где первый индекс соответствует номеру линейки, второй – краю линейки (верхний край – 0, нижний – 1). После поворота клина

снимаются следующие два отсчета  $R'_{11}$  и  $R''_{11}$  на правой центральной линейке. По полученным данным определяются номера “нулевых” пикселей  $L_{10}$  левой и  $R_{11}$  правой линеек, соответствующих середине диапазона переналожения краев линеек, как целого от среднего значения отсчетов по формулам

$$L_{10} = \frac{1}{2} \cdot (l_{10} + N - r_{11});$$

$$R_{11} = \frac{1}{2} \cdot (r_{11} + N - l_{10}),$$

где

$$l_{10} = \frac{L'_{10} + L''_{10}}{2},$$

$$r_{11} = \frac{R'_{11} + R''_{11}}{2},$$

$N$  – число пикселей линейки сканера.

Соответственно, размер зоны переналожения линеек равен

$$\Delta L_{10} = \Delta R_{11} = 2 \cdot L_{10}.$$

На рис. 6 приведена схема измерения углового расстояния между смежными фотоприемными линейками в горизонтальной плоскости (для центральных линеек). Значение угла  $\varphi_{11}$  между центрами краевых зон центральных (левой и правой) фотоприемных линеек сканера в горизонтальной плоскости рассчитывается по формуле

$$\varphi_{11} = 2 \cdot \psi - \frac{P_{ск}}{2 \cdot f'_{ск}} [(L''_{10} - L'_{10}) - (R'_{11} - R''_{11})],$$

где  $f'_{ск}$  – фокусное расстояние сканера,  $P_{ск}$  –

размер пикселя линейки сканера,  $\psi$  – угол отклонения луча клином.

Аналогичным образом определяются значения двух углов между центрами краевых зон периферических фотоприемных линеек  $\varphi_{21}, \varphi_{12}$ .

Рис. 6 поясняет схему калибровки углов между ВО сканера и нормальными к соответствующим граням МП.

Угол между ВО сканера и нормалью к “нулевой” грани МП в вертикальной плоскости  $\gamma_{0y}$  (см. рис. 6, а) определяется как разность двух углов: угла между ВО коллиматора и ВО сканера  $\gamma'_{0y}$  и угла между ВО коллиматора и нормалью к “нулевой” грани МП  $\gamma''_{0y}$  по формуле

$$\gamma_{0y} = \gamma'_{0y} - \gamma''_{0y} = \pi - \varepsilon_y + \frac{l_{10} - L_{10}}{f'_{ск}} P_{ск} - \alpha_{0y} + \beta_{ky},$$

где  $\varepsilon_y$  – угловое расстояние между вершиной прямого угла и центром креста треугольной марки коллиматора (см. рис. 5, б), рассчитанное по формуле

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{f'_{кол}}.$$

Аналогичным образом определяются все остальные углы между проекциями ВО сканера, соответствующими серединам переналожения периферических зон фотоприемных линеек и нормалей к соответствующим граням МП на вертикальную плоскость.

Для этого сканер наклоняется относительно нулевого положения на угол  $\theta_i$ , где  $i=1-4$  – номер грани МП, как показано на рис. 7, б. Значение угла  $\theta_i$  примерно равняется углу меж-

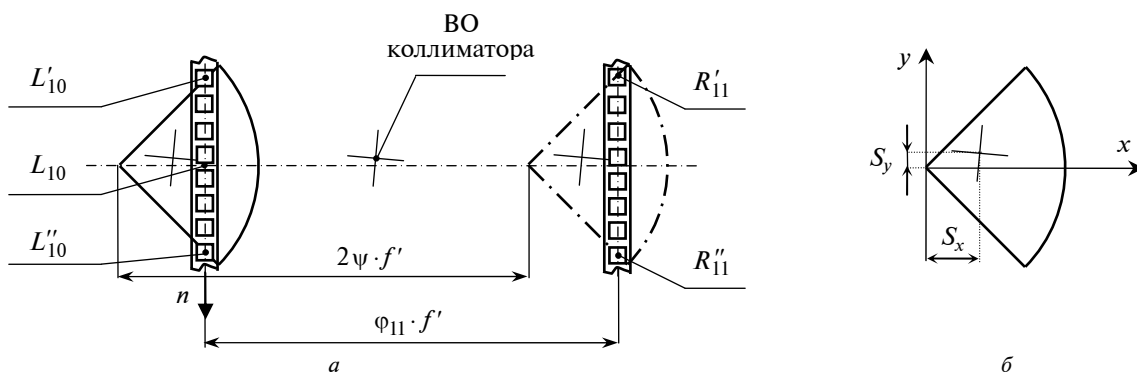


Рис. 6. Схема измерения: а – изображения марки коллиматора на центральных фотоприемных линейках, где  $n$  – номер пикселя (отсчет сверху вниз),  $L_{10}$  – нулевой пиксель сканера,  $\psi$  – угол отклонения луча клином; б – координаты центра креста марки относительно вершины прямого угла сегмента марки

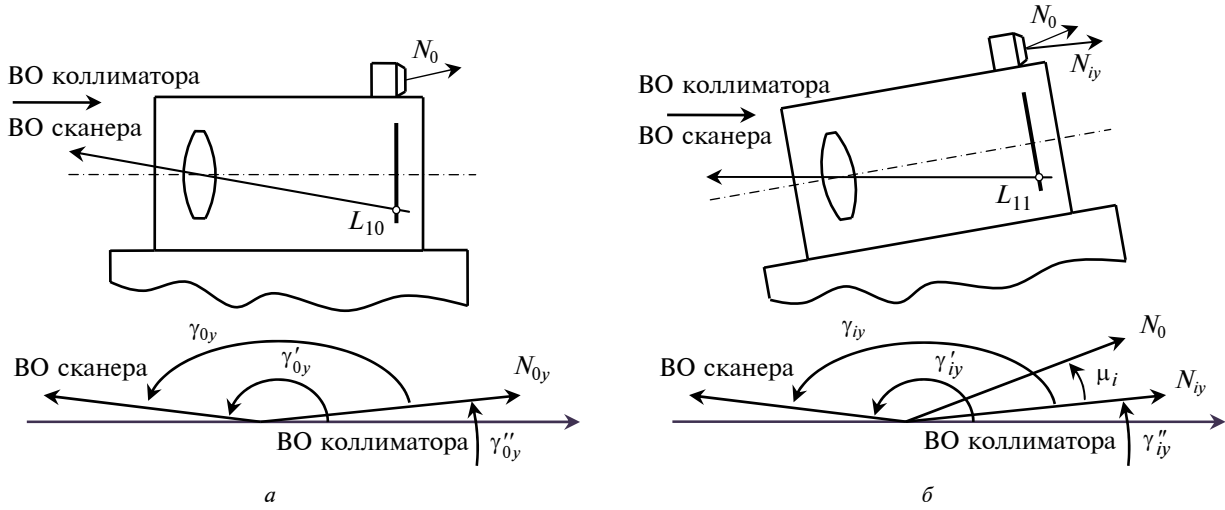


Рис. 7. Схема расположения ВО сканера и коллиматора относительно нормалей МП в вертикальной плоскости: а – в исходном положении сканера; б – при наклоне сканера

ду “нулевой” и  $i$ -й гранями. Световой поток ФАК, отразившись от  $i$ -й грани МП, фокусируется на матрицу ФАК с центром в точке  $b_i$  с координатами  $x_i, y_i$ , и рассчитывается угловое положение проекции нормали к  $i$ -й грани МП относительно визирной оси ФАК в горизонтальной и вертикальной плоскостях по формулам

$$\alpha_{ix} = \frac{x_i - x_c}{2f'_{\text{ФАК}}} \cdot P_{\text{ФАК}};$$

$$\alpha_{iy} = \frac{y_i - y_c}{2f'_{\text{ФАК}}} \cdot P_{\text{ФАК}}.$$

После этого рассчитывается угол между проекциями ВО сканера и нормали к  $i$ -й грани МП в вертикальной плоскости  $\gamma_{iy}$  по формуле

$$\begin{aligned} \gamma_{iy} &= \gamma'_{iy} - \gamma''_{iy} = \\ &= \pi - \varepsilon_y + \frac{s_{ik} - S_{ik}}{f'_{\text{СК}}} P_{\text{СК}} - \alpha_{0y} + \beta_{ky} + \mu_i, \end{aligned}$$

где

$$s_{ik} = \begin{cases} l_{ir} & \text{для левых линеек,} \\ r_{ik} & \text{для правых линеек,} \end{cases}$$

$$S_{ik} = \begin{cases} L_{ik} & \text{для левых линеек,} \\ R_{ir} & \text{для правых линеек,} \end{cases}$$

$i = 1-4$  – номер грани МП,  $k = 0$  для верхнего края линейки и  $k = 1$  для нижнего края линейки,  $\mu_i$  – угол между “нулевой” и  $i$ -й гранью МП.

Аналогичным образом рассчитываются значения соответствующих углов  $\gamma_{ix}$  в горизонтальной плоскости для всех граней МП.

Угол наклона фотоприемных линеек относительно вертикальной оси сканера рассчитывается по измеренным значениям номеров пикселей линеек на границах изображения треугольных зон марки коллиматора, как показано на рис. 8, при двух привязках сканера на границах фотоприемных линеек.

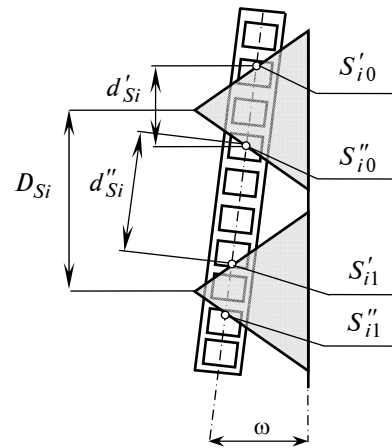


Рис. 8. Схема определения углового отклонения линии регистров фотоприемных линеек относительно вертикальной оси сканера

Обозначим соответствующие отрезки на линейке как

$$d'_{Si} = S''_{i0} - S'_{i0};$$

$$d''_{Si} = S'_{i1} - S''_{i0};$$

$$D_{Si} = \frac{1}{2} (S''_{i1} - S'_{i1} - S''_{i0} + S'_{i0}).$$

Тогда формула для расчета угла наклона  $i$ -й фотоприемной линейки запишется как

$$\omega_i = \arccos \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{D_{Si}}{d'_{Si} + d''_{Si}} + \sqrt{2 - \frac{D_{Si}^2}{(d'_{Si} + d''_{Si})^2}} \right) \right] - \Delta\alpha_i,$$

где  $\Delta\alpha$  – поправка, которая рассчитывается по формуле

$$\Delta\alpha_i = \alpha_{ix} - \alpha_{(i-1)x},$$

где  $\alpha_{ix}$  и  $\alpha_{(i-1)x}$  – угловое положение нормалей соответственно к  $i$ -й и  $(i-1)$ -й граням МП относительно оси визирования ФАК в горизонтальной плоскости.

## References

- [1] A.S. Vasilevsky *et al.*, “The technique of terrestrial geometric calibration of imaging cameras on linear CCDs”, *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, vol. 1, no. 2, pp. 216–221, 2005.
- [2] D.A. Kozhevnikov and R.V. Fedortsev, “A method for geometric calibration of optoelectronic systems based on an electronic test object”, *Pribery i Metody Izmerenij*, vol. 8, no. 4, pp. 374–385, 2017.
- [3] S.A. Arkhipov *et al.*, “Photogrammetric parameters of optoelectronic equipment”, *Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. Priborostroenie*, no. 4, pp. 103–114, 2008.
- [4] A.I. Vasiliev, “Calibration of the surveying instruments of the spacecraft “Kanopus-V” during its operation”, *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, vol. 12, no. 1, pp. 203–214, 2015.
- [5] Leong KeongKwoh *et al.*, “Development of camera model and geometric calibration/validation of XSAT iris imagery”, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012XXII ISPRS Congress*, vol. XXXIX-B1, 25 August–01 September 2012, pp. 239–243.
- [6] T.I. Gural *et al.*, “Apparatus for measuring the optical transfer function of lenses”, in *Proc. X Int. Sci. Tech. Conf. Instrument-Making: State and Perspectives*, Kyiv, Ukraine, 19–20 April 2011, pp. 60–61.
- [7] G.D. Boreman, *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*, vol. TT52. Bellingham: SPIE Press, 2001, p. 110. doi: 10.1117/3.419857
- [8] T.I. Gural *et al.*, “Method of calibration of the angular parameters of the OEP”, in *Proc. XI Int. Sci. Tech. Conf. Instrument-Making: State and Perspectives*, Kyiv, Ukraine, 24–25 April 2012, pp. 52–53.

Т.М. Генсіцька, Т.І. Гураль, В.М. Тягур

## МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ КУТОВИХ ПАРАМЕТРІВ СКАНЕРІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

**Проблематика.** У процесі виготовлення сканера дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) одним із найбільш відповідальних етапів є його калібрування. Тому задача розробки високоточного методу визначення кутових параметрів сканера, математичного алгоритму обробки даних і схемного рішення відповідної апаратури є досить актуальною.

**Мета дослідження.** Розробка методики калібрування, математичного алгоритму обробки даних і схемного рішення відповідного метрологічного обладнання для сканера ДЗЗ.

**Методика реалізації.** Запропоновано метод вимірювання положення візирних осей фотоприймальних лінійок сканера відносно його контрольного елемента на основі використання колімаційного вимірювального комплексу. При цьому зображення трикутної марки, що генерується коліматором апаратури на нескінченності, будується одночасно на фотоприймальних лінійках сканера і в площині аналізу фотоелектричного автоколіматора. Фотоелектричний автоколіматор реєструє кутове положення марки відносно нормалі до площини контрольного елемента сканера.

**Результати дослідження.** Розроблено методику наземної передпольотної калібрування кутових параметрів сканера ДЗЗ, математичний алгоритм обробки даних і схемне рішення відповідного метрологічного обладнання.

**Висновки.** Запропоновано методику калібрування сканера ДЗЗ із декількома лінійними приймачами зображення, розроблено схемне рішення відповідного метрологічного обладнання на базі стенда контролю модуляційної передавальної функції

## Выводы

Предложены методика наземной предпольотной калибровки угловых параметров сканера ДЗЗ, математический алгоритм обработки данных и соответствующее метрологическое оборудование.

Показана возможность измерения визирных осей фотоприемных линеек сканера относительно граней его контрольного элемента в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение факторов, влияющих на точность измерения и оптимизацию схемного решения для его практической реализации.

сканера. Показано можливість вимірювання положення візирних осей фотоприймальних лінійок сканера відносно його контрольного елемента у двох взаємно перпендикулярних площинах. Проведено математичне моделювання та обґрунтовано можливість реалізації запропонованого методу.

**Ключові слова:** колімаційний вимірювальний комплекс; сканер дистанційного зондування Землі; кутові параметри.

T.M. Gensitska, T.I. Gyal, V.M. Tiagur

#### CALIBRATION METHOD FOR ANGULAR PARAMETERS OF THE EARTH'S REMOTE SENSING SCANNERS

**Background.** During manufacture of the Earth's remote sensing (ERS) scanner one of the most crucial task is its calibration. Therefore, a task to develop a high precision method for determining the ERS scanner angular parameters, its data processing algorithm, and a design for corresponding equipment is actual one.

**Objective.** The aim of the paper is to develop a calibration technique, a data processing algorithm, and a design for corresponding metrology equipment for the ERS scanner.

**Methods.** The method for the angular position calibration of ERS scanner photodetector line axes of sight relatively its control element based on the use of collimation measuring system is suggested. However, an image of the triangle mark, generated by the equipment collimator at the infinity, is built simultaneously on the scanner photodetector lines and photoelectrical autocollimator focal plane. The autocollimator registers the mark angle position relative to normal to plane of the scanner control element.

**Results.** A technique for ground-based pre-flight calibration of the angular parameters of ERS scanner, a mathematical algorithm for data processing, and corresponding metrological equipment were developed.

**Conclusions.** A calibration technique of ERS scanner with several image linear detectors is proposed. Corresponding metrological equipment design based on the scanner modulation transfer function control testing unit is developed. The possibility of measuring the sighting axes of the photodetector lines of the scanner relatively its control element in two mutually perpendicular planes is demonstrated. Mathematical modeling is executed, and the possibility of implementing the proposed method is performed.

**Keywords:** collimating measuring system; Earth's remote sensing scanner; angular parameters.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
4 вересня 2018 року

Прийнята до публікації  
28 лютого 2019 року