

**ВЫБОР СКАНЕРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

© 2016 г. **С. И. Артамонов; Н. А. Грязнов**, канд. физ.-мат. наук;  
**В. И. Купренюк**, канд. физ.-мат. наук; **Н. А. Романов; Е. Н. Соснов**

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург

E-mail: s.artamonov@rtc.ru, gna@rtc.ru, v.kuprenyk@rtc.ru, e.sosnov@rtc.ru, n.romanov@rtc.ru

Проведен сравнительный анализ параметров сканеров трех типов для лазерных локационных систем, предназначенных для определения рельефа с целью обеспечения безопасной посадки космических аппаратов на поверхность космического объекта. Рассмотрены следующие схемы двухкоординатного сканирования: сканер проходного типа на основе вращающихся клиньев (сканер Рисли), сканер с 12-гранной призмой строчной развертки и кадровым дефлектором на основе одноосного качающегося зеркала, сканер на основе качающегося зеркала в двухосевом кардановом подвесе. Проведены расчеты траекторий сканирования и оценки необходимой программной коррекции координат пучка в предметной плоскости по отношению к координатам, соответствующим измеряемым углам отклонения дефлекторов системы сканирования.

***Ключевые слова:** лазерная локация, траектория сканирования, искажения растра, компенсация искажений траектории сканирования, управление частотой лазерных импульсов.*

Коды OCIS: 280.3640

*Поступила в редакцию 22.04.2016*

**Введение**

При проведении операций сближения, стыковки и посадки на планеты и астероиды космических аппаратов (КА) необходим динамический контроль взаимной ориентации объектов и КА, дистанции между ними и рельефа поверхности в месте посадки. При решении этих задач лазерные локационные системы (ЛЛС) обладают рядом решающих преимуществ, обусловленных различием длин волн зондирующего излучения [1], перед радиотехническими средствами.

К настоящему времени проведен ряд успешных испытаний ЛЛС, решающих задачи сближения и стыковки [2, 3], и разрабатываются системы посадки КА на небесные тела [4, 5]. В их число входят как ЛЛС, сканирующие узким лазерным лучом по полю зрения, так и ЛЛС без сканирования (флэш-лидары), которые можно отнести к активным лазерным системам видения.

Флэш-лидары не используют мехатронных узлов сканирования, что является важным достоинством в космических применениях. Но при работе флэш-лидаров по диффузно отражаю-

щим объектам на дальностях более нескольких сотен метров и при широких полях зрения системы (20–40°) требуются лазеры с энергией выше 10 Дж. Энергопотребление, масса и габариты таких лазеров выходят за рамки допустимых для большинства КА [1]. Кроме того, для реализации флэш-лидара с необходимым угловым разрешением необходим высокочувствительный широкополосный матричный фотоприемник (ФП) размером не менее 512×512, причем в каждом пикселе матрицы должна быть размещена интегральная схема измерения временного интервала между излучением и приемом лазерного импульса. Технологией создания таких матриц для ближнего инфракрасного (ИК) диапазона длин волн занимается ограниченное число фирм и пока их разработки далеки от стадии реализации в серийном производстве [6, 7].

По этим причинам для космических применений продолжают разрабатываться сканирующие ЛЛС [2, 8]. Типовые технические требования к ЛЛС для обеспечения безопасной посадки на космические объекты, например на поверхность Луны, приведены в таблице [4].

Технические требования к ЛЛС для космических применений

Параметр	Значение
Максимальная дистанция, м	5000
Минимальная дистанция, м	10
Угловое поле зрения $\Omega$ , град	40×40
Угловое разрешение $\Delta\varphi$ , град	менее 0,05
Точность по дальности (на дистанции, м), м	менее 5 (5000)
	менее 0,1 (300)
	менее 0,02 (10)
Частота кадров, Гц	более 10
Вертикальная скорость при посадке (на дистанции, м), м/с	50 (5000)
	5 (5)
Горизонтальная скорость при посадке (на дистанции, м), м/с	50 (5000)
	5 (5)
Наклон, град/Скорость изменения положения относительно нормали к поверхности, град/с	менее 2/менее 0,05
Размер площадки для безопасной посадки, м	5×5
Локальный наклон/Неровность площадки посадки, град/м	менее 10/менее 0,5
Точность ориентации по азимуту/углу места, град	менее 0,02
Масса/Энергопотребление, кг/Вт	менее 10/менее 60

Как следует из ее данных, количество элементов разрешения ( $N$ ) в строке сканирования должно быть

$$N = \Omega/\Delta\varphi \approx 800,$$

где  $\Omega$  – угловой размер зоны обзора,  $\Delta\varphi$  – элемент разрешения.

При использовании традиционной схемы поточечного сканирования количество зондирующих лазерных импульсов на кадр составляет  $N^2 \approx 640000$ . Даже при низкой частоте кадров,  $f = 1$  Гц, потребуется лазер с частотой импульсов 640 кГц, а угловая скорость строчного сканирования пространства лазерным лучом должна быть не ниже  $\omega = \Omega N f = 32000$  град/с (558 рад/с). В этом случае интервал между импульсами составит около 1,5 мкс, однозначность измерения дистанции времяпролетным методом будет обеспечена на дальности менее 225 м.

Как видно из приведенных оценок, схема поточечного сканирования предъявляет предельно высокие требования как к параметрам лазера, так и к параметрам дефлектора строчного сканирования, но и в этом случае она не обеспе-

чивает однозначности измерений при необходимых дальностях.

По этим причинам все большее внимание привлекают гибридные схемы ЛЛС, в которых и скорость строчной развертки, и частота следования лазерных импульсов могут быть снижены на 1–2 порядка за счет перехода от одиночного ФП к малоразмерному (10–100 элементов) массиву ФП, каждый из которых имеет поле зрения, соответствующее требуемому угловому разрешению ЛЛС. При этом нужно увеличить в соответствующее размерности массива количество раз энергию лазерного импульса, согласовав расходимость зондирующего лазерного пучка с суммарным полем зрения массива ФП. При количестве элементов массива ФП по строчной и кадровой координатам  $n \times m$  и фиксированной частоте кадров  $f$  угловая скорость развертки по каждой из координат и частота следования лазерных импульсов могут быть снижены в соответствующее число раз. При использовании линейки ФП ( $n = N, m = 1$ ) может быть использован однокоординатный сканер с частотой развертки, соответствующей требуемой кадровой частоте ЛЛС.

Известны гибридные системы с линейной матрицей из 256 приемных площадок [9], с малоразмерным (32×32) матричным ФП [10], с ФП на основе малоразмерного (64 элемента) массива отдельных ФП с оптоволоконной линейной входной апертурой [11]. Использование гибридных схем ЛЛС позволяет достичь технического компромисса между жесткими требованиями к ФП и энергетике лазера, необходимыми флэш-лидарам, и сложностью реализации достаточно высоких скорости строчного сканирования и частоты импульсов лазера, необходимых для локационных систем поточечного сканирования. Уменьшение частоты следования импульсов практически снимает проблему однозначности измерения дистанции времяпролетным методом.

Возможность снижения необходимой скорости сканирования существенно расширяет возможности выбора типа и характеристик строчного дефлектора системы сканирования. Как следует из публикации [12], скорости сканирования лучом на уровне 60 рад/с могут быть обеспечены не только сканерами на основе вращающейся многогранной призмы [13], но и сканерами на основе качающихся зеркал с электро-механическим приводом. В гибридной схеме ЛЛС возможно и применение сканеров проходного типа на основе пар равномерно вращающихся клиньев [10].

Наряду с частотой кадров, определяющей скорость обновления информации, основным параметром ЛЛС является точность воспроизведения формы и положения объектов в поле зрения, которая определяется разрешающей способностью системы по дальности и по поперечным координатам, а также точностью определения поперечных координат точек объекта в плоскости предметов по данным датчиков углового положения дефлекторов сканера.

Из литературы, посвященной разработке тепловизионных и лазерных сканирующих систем [14], известно, что даже при постоянных угловых скоростях строчной и кадровой развертки траектории сканирующего луча (оси визирования ФП-устройства) в предметной плоскости могут отличаться от прямолинейных, что проявляется как отличие раstra сканирования от прямоугольного. Изменение скорости развертки в пределах кадра приводит к дополнительным искажениям траекторий сканирующего луча в предметной области. Координаты наблюдаемой точки по координате  $x_i$  должны рассчитываться по формуле  $x_i = Ltg(2\varphi_{ix} + \Delta\varphi_{ix})$ , где  $L$  – измеренная дистанция до объекта,  $\varphi_{ix}$  – угол поворота дефлектора по координате  $x_i$ , регистрируемый датчиком углового положения,  $\Delta\varphi_{ix}$  – угловая поправка, хранящаяся в памяти в виде карты (полинома) поправок.

В литературе приведены интегральные оценки степени отклонения формы раstra от прямоугольной в некоторых вариантах сканеров, однако детальное сравнение различных сканеров по характеру и степени искажений траекторий сканирования и расчет требуемых угловых поправок показаний датчиков угла поворота не проводились.

Ниже рассмотрены результаты расчета истинных траекторий сканирования трех представляющих практический интерес схем реализации двухкоординатного сканирования и проведен анализ факторов, приводящих к нелинейной связи между углами поворота сканирующих элементов ЛСС и поперечными координатами точки подсвета в предметной плоскости. Знание истинных траекторий сканирования позволяет сформировать карту поправок, которые следует вводить в результаты пространственных измерений. В некоторых случаях поправки должны учитываться и в системе управления частотой следования зондирующих лазерных импульсов. Расчеты проведены для ЛЛС с параметрами, приведенными в таблице.

## Сканер с призмным дефлектором

Сканер с дефлектором в виде вращающейся многогранной зеркальной призмы является наиболее распространенным вариантом сканера для авиационных топографических систем, в которых сканирование по второй координате осуществляется за счет движения носителя [8]. К главным достоинствам сканера в этих системах относятся высокая частота строчного сканирования, обусловленная высокой скоростью равномерного вращения и большим количеством граней призмы, и прямолинейность траектории сканирования. Очевидными недостатками являются габаритный размер сканера и большая масса сканирующего зеркала в виде многогранной (6–12 граней) призмы.

Рассмотрим сканер в виде комбинации 12-гранной призмы, вписанной в круг диаметром 150 мм, и одноосного качающегося зеркала, осуществляющего кадровую развертку с постоянной угловой скоростью в пределах кадра [13].

Расчет угла отклонения пучка при отражении от каждого из зеркал проводился по формуле [15]

$$S_1 = S - 2(S \cdot N) \cdot N,$$

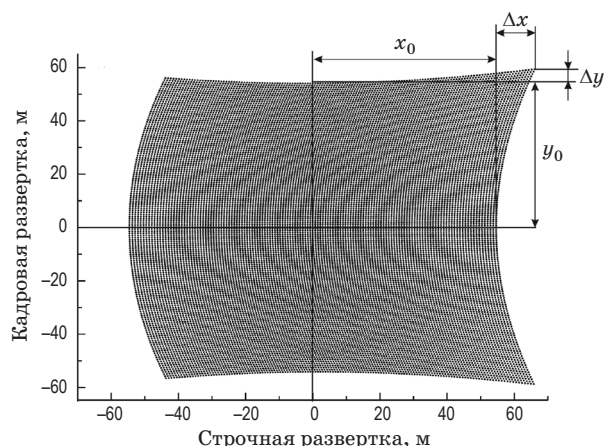
где  $N$ ,  $S$ ,  $S_1$  – векторы, задающие направление нормали к зеркалу, направления падающего и отраженного лучей в базовой системе координат. Размеры и ориентация сечения принимаемого пучка рассчитывались при условиях, что апертурной диафрагмой является световой размер 30×60 мм грани призмного зеркала, расстояние между качающимся зеркалом кадровой развертки и призмным зеркалом строчной развертки по оптической оси – 70 мм, а световые размеры зеркала кадровой развертки и объектива ФП-устройства были выбраны достаточно большими, чтобы не вносить дополнительного виньетирования.

Переход от одиночной вращающейся зеркальной призмы, используемой в авиационных системах картографирования, к двухзеркальной системе сканирования приводит к двум важным следствиям. Во-первых, в результате выхода лазерного луча при кадровом сканировании из плоскости, перпендикулярной оси вращения призмного зеркала, траектории сканирования в плоскости предметов перестают быть прямолинейными и эквидистантными. Во-вторых, при больших углах отклонения апертура принимаемого пучка в плоскости объектива ФП-системы

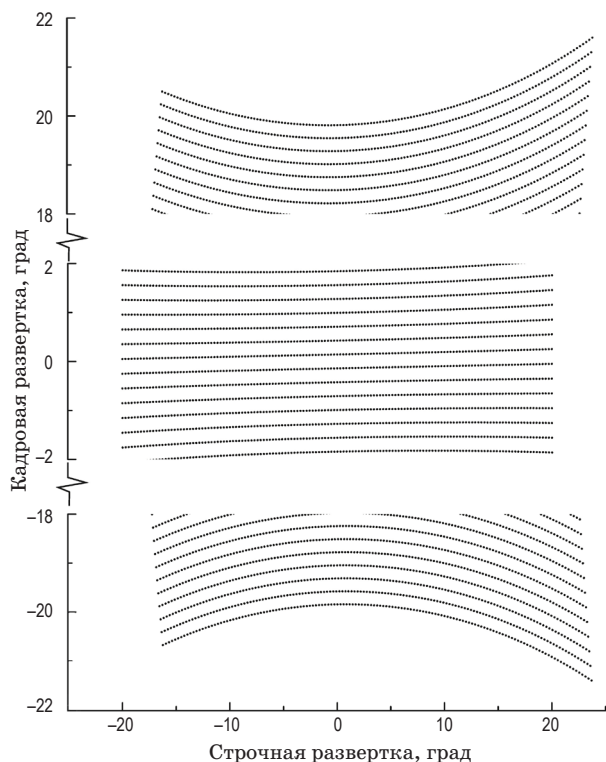
перестает быть прямоугольной и центрированной относительно оптической оси объектива.

На рис. 1 приведены результаты расчета формы раstra сканирования в предметной плоскости, удаленной на 150 м, а на рис. 2 – расчетные траектории сканирования трех зон раstra, соответствующие сканеру с углом отклонения лазерного луча  $\pm 20^\circ$  по каждой из координат.

Видно, что траектории сканирования при смещении от центра раstra заметно искривля-



**Рис. 1.** Результаты расчета формы зоны сканирования на дистанции 150 м. Диапазон сканирования  $\pm 20^\circ$ .



**Рис. 2.** Результаты расчета траекторий сканирования сканера с призмным дефлектором трех зон раstra. Диапазон сканирования  $\pm 20^\circ$ .

ются, расстояние между строками в пределах раstra меняется незначительно, но форма раstra заметно отличается от прямоугольной, и он не симметричен относительно вертикальной плоскости. Это значит, что координаты точки наблюдения в предметной плоскости неоднозначно связаны с углами поворота сканирующих зеркал, которые непосредственно измеряются датчиками углового положения строчных и кадровых зеркал сканера.

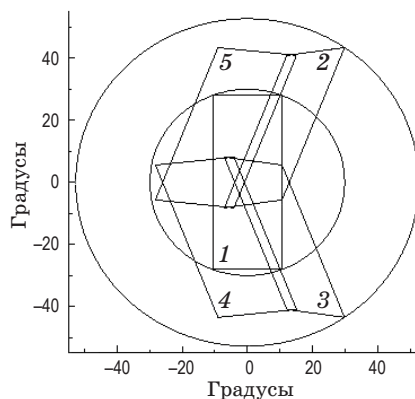
Максимальная амплитуда растровых искажений может быть оценена с помощью соотношений, аналогичных приведенным в публикации [14]

$$\Delta y / y_0 = [\cos(\Omega / 2)(1 - \operatorname{tg}^3(\Omega / 2))]^{-1} - 1,$$

$$\Delta x / x_0 = [1 + \operatorname{tg}(\Omega / 2)][1 + \operatorname{tg}^3(\Omega / 2)]^{-1} - 1.$$

Здесь  $y_0$ ,  $x_0$  – расчетные размеры зоны сканирования,  $\Delta y$ ,  $\Delta x$  – разница между истинными и расчетными размерами зоны сканирования, обусловленная искажениями раstra (см. рис. 2). При  $\Omega = 40^\circ$   $\Delta y / y_0 \approx 0,09$  и  $\Delta x / x_0 \approx 0,21$ .

На рис. 3 приведены результаты расчета формы и положения эффективной световой апертуры принимаемого пучка в плоскости объектива ФП-системы. Видно, что эффективная световая апертура сканера, которая при достаточно большом зеркале кадровой развертки определяется проекциями границ зеркала призмы на плоскость объектива, остается прямоугольной только в зоне малых углов отклонения. При увеличении углов отклонения световая апертура приобретает форму параллелограмма, а ее центр смещается относительно оптической оси



**Рис. 3.** Результаты расчета формы и положения эффективной световой апертуры сканера с призмным дефлектором при углах отклонения оси поля зрения 1 –  $(0^\circ, 0^\circ)$ , 2 –  $(-20^\circ, -20^\circ)$ , 3 –  $(-20^\circ, 20^\circ)$ , 4 –  $(20^\circ, 20^\circ)$ , 5 –  $(20^\circ, -20^\circ)$ .

системы. Окружностями обозначены необходимые габариты входной линзы объектива, соответствующие системе с малыми углами сканирования и системе с углами отклонения пучка  $\pm 20^\circ$  по двум координатам. Видно, что системе широкоугольного сканирования требуется объектив вдвое большего диаметра.

Таким образом, сканер данного типа обеспечивает достаточно равномерное заполнение поля зрения излучением зондирующего лазера и наблюдение заданной зоны пространства без пропусков. Однако траектории сканирования лучом по предметной плоскости являются криволинейными и для проведения измерений координат объектов в предметной плоскости требуется коррекция измеряемых энкодерами углов поворота зеркал.

Использование двух разнесенных в пространстве зеркал приводит к отмеченному выше недостатку схемы, связанному с зависимостью формы и положения световой апертуры принимаемого пучка относительно центра приемного объектива от направления оси визирования. В результате при использовании схемы требуется объектив, диаметр которого вдвое превышает максимальный мгновенный размер принимаемого пучка.

### Качающиеся зеркала

Для обеспечения сканирования предметной плоскости может быть использована также система из двух качающихся зеркал, оси вращения которых взаимно перпендикулярны [2], или одно качающееся зеркало в двухосном кардановом подвесе [16].

Среди испытанных в космосе систем данного класса наилучшие результаты показал лазерный сканирующий локализатор RLS (*RendezvousLidarSensor*) фирмы MDA *Optech* (Канада) [17]. Система построена на основе волоконного лазера с длительностью импульса излучения 1 нс, работающего при частоте повторения от 8 до 10 кГц. Сканирование по ортогональным координатам осуществлялось одним зеркалом в поле зрения  $\pm 10^\circ$ . При работе по диффузно-отражающему объекту удалось достичь рабочей дальности 3 км. При этом точность определения дальности составила 1 см, погрешность определения углового положения –  $0,1^\circ$ . Время сканирования полного кадра – 1 с. Масса прибора 10 кг, энергопотребление 75 Вт. Возможность применения одного, качающегося по двум координатам зеркала в этом локализаторе обусловлена

малым углом сканирования и малым числом элементов разрешения ( $100 \times 100$ ), при которых угловая скорость строчного сканирования в центре кадра не превышает 3 об/с.

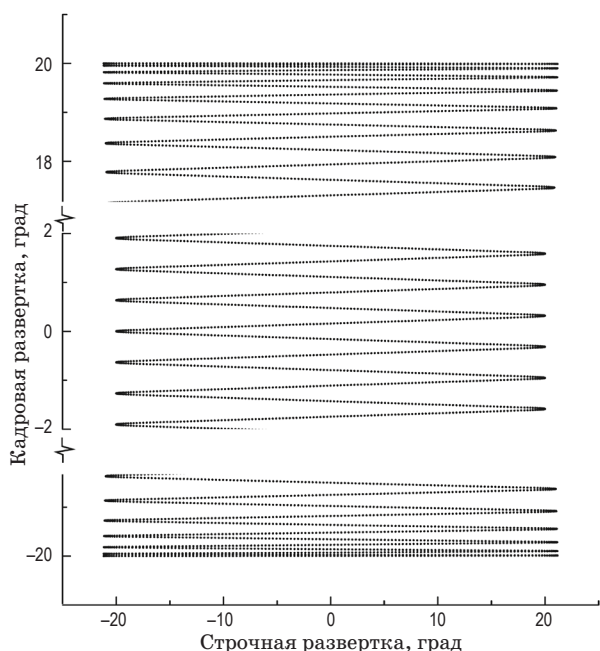
Лазерная локационная система типа TGM [16] имеет существенно больший угол сканирования ( $40^\circ$ ) и число элементов разрешения ( $200 \times 200$ ), но использует ту же частоту следования лазерных импульсов, поэтому время сканирования полного кадра составляет не менее 4 с, а необходимая скорость строчного сканирования в центре кадра – 5,5 об/с. При использовании двух разнесенных зеркал система сканирования обладает тем же, что и в случае сканера с призмным дефлектором, недостатком: отклоненный первым зеркалом луч выходит из главной продольной плоскости, что приводит к искажению формы раstra сканирования, аналогичному предыдущей системе.

Для уменьшения искажений раstra целесообразно использовать зеркало, установленное в двухосный карданов подвес. В этом случае две ортогональные оси вращения пересекаются в центре зеркала, через который направляется и ось сканирующего пучка. Возможны различные варианты относительного расположения осей вращения и плоскости зеркала. В литературе [14] рассмотрены варианты, в которых сканирующее зеркало ориентировано под углом  $45^\circ$  к одной из осей вращения, а вторая ось лежит в плоскости зеркала. С точки зрения минимизации моментов инерции представляет интерес и вариант, в котором обе оси вращения лежат в плоскости зеркала. Как показали проведенные в ходе работы расчеты, в зависимости от выбора взаимной ориентации падающего пучка и осей вращения зеркала искажения раstra и траекторий сканирования, а следовательно, и амплитуды необходимой программной коррекции, различаются, но остаются значительно меньшими, чем в ранее рассмотренных сканерах.

На рис. 4 приведены результаты расчета формы раstra, а на рис. 5 – траекторий сканирования в центральной и периферийной зонах в случае, при котором сканирующий лазерный пучок падает на зеркало в кардановом подвесе, установленное под углом  $45^\circ$  к кадровой оси, параллельно этой оси и перпендикулярно строчной оси сканирования. Рассмотрен вариант, при котором график угловой скорости приводов строчной и кадровой развертки имеет вид трапеции с зонами нарастания и спада скорости, занимающими не более 10% углового диапазона.



**Рис. 4.** Результаты расчета формы зоны сканирования в пространстве предметов для схемы с зеркалом в кардановом подвесе. Диапазон сканирования  $\pm 20^\circ$ .



**Рис. 5.** Результаты расчета траекторий сканирования трех зон раstra сканера с зеркалом в кардановом подвесе. Диапазон сканирования  $\pm 20^\circ$ .

Видно, что растр гораздо более симметричен, чем в случае призмного сканера, степень деформации его вертикальных границ не превышает  $\Delta x/x_0 \approx 5\%$ . Скорость горизонтальной и вертикальной развертки в зоне, составляющей 80% раstra по каждой из координат, постоянна, что обеспечивает прямолинейность траекторий сканирования и отсутствие зон, в которых объект может оказаться ненаблюдаемым.

Результаты расчетов показывают, что однозеркальная схема сканера, в отличие от рассмотренных выше двухзеркальных схем, обеспечивает наиболее равномерный растр сканиро-

вания, минимальные поправки к измеренным координатам и оптимальное согласование апертуры сканирующего зеркала с апертурой приемного телескопа.

Основной проблемой реализации схемы является обеспечение требуемой скорости строчного возвратно-поступательного сканирования. Достижимые в настоящее время угловые скорости движения зеркал со световым размером 50–80 мм (6–10 об/с) недостаточны для схем поточечного сканирования. Однако переход к гибридной схеме сканирования, позволяющий существенно снизить требования к скорости сканирования, делает однозеркальный сканер весьма перспективным.

### Сканер Рисли

Интерес к использованию сканера проходного типа связан с его конструктивной простотой и простотой компоновки ЛЛС с таким сканером. Сканер состоит из двух пар оптических клиньев, установленных перпендикулярно оптической оси приемного канала. Каждая пара смонтирована внутри механической оправы, обеспечивающей встречное вращение клиньев с одинаковой угловой скоростью вокруг оси оправы, совпадающей с оптической осью. В результате встречного вращения клиньев в паре прошедший через нее луч света периодически отклоняется, практически не выходя из плоскости, в которой лежат оптическая ось и точки совпадения максимальных и минимальных толщин клиньев при вращении. Плоскости сканирования разных пар клиньев ортогональны, что обеспечивает реализацию телевизионной развертки. При полном обороте каждого клина осуществляется полный период (туда и обратно) развертки луча по строке (кадру).

При малых (менее  $3^\circ$ ) углах клина  $\beta$  угол отклонения пучка на одиночном клине  $\alpha_0 = \beta(n - 1)$ , где  $n$  – показатель преломления материала клина. При встречном вращении клиньев в противоположных направлениях  $\alpha(\varphi) = 2\alpha_0 \cos(\varphi)$ , где  $\varphi$  – угол поворота клиньев. Поэтому сканер Рисли при постоянной скорости вращения клиньев не обеспечивает постоянной угловой скорости сканирования лучом по предметной области. Соответственно, для обеспечения равномерности покрытия зоны обзора лазерным излучением необходимо обеспечить изменение частоты следования импульсов в ходе сканирования строки по косинусоидальному закону.

Наряду с рассмотренной выше схемой сканера с косинусоидальной кадровой разверткой возможна реализация варианта шаговой кадровой развертки, в котором переход на новую строку осуществляется быстрым поворотом кадровой пары клиньев на необходимый угол, а также варианта замены кадровой пары клиньев качающимся зеркалом или зеркалом на шаговом приводе.

Для интересующих нас больших углов отклонения пучка ( $\pm 20^\circ$ ) отклонение на одном клине должно составлять около  $\pm 10^\circ$  и приближение малых углов неприменимо [15, 18]. Для расчета отклонения луча в системе из четырех клиньев при произвольных углах клина использовалась векторная форма закона Снеллиуса, который для одной границы раздела может быть записан в виде [15]

$$n_2 \cdot \mathbf{S}_2 = n_1 \mathbf{S}_1 - (n_1 \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{N}) \cdot \mathbf{N} + \mathbf{N} \{ n_2^2 - n_1^2 + (n_1 \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{N})^2 \}^{1/2},$$

где  $\mathbf{N}$  – вектор нормали к границе двух сред,  $\mathbf{S}_1$ ,  $\mathbf{S}_2$  – единичные векторы падающего и преломленного лучей,  $n_1$ ,  $n_2$  – показатели преломления сред. При проведении расчета системы клиньев закон применялся последовательно к восьми границам раздела.

Результаты расчетов формы раstra сканера Рисли в предметной плоскости, удаленной на 150 м, приведены на рис. 6, а расчетные траектории сканирования трех зон раstra, соответствующие сканеру с углом отклонения пучка  $\pm 20^\circ$  по каждой из координат – на рис. 7. Расчеты проведены для пар клиньев из ZnSe с углом клина  $7,65^\circ$ .

Видно, что растр заметно отличается от прямоугольного и не симметричен относительно вертикальной плоскости, проходящей через нулевую точку. При этом траектории сканирования сильно искривлены и даже центральная строка не является прямой линией. Это является следствием нелинейной зависимости угла отклонения от угла падения при больших углах клина и выхода преломленного на первом клине луча из меридиональной плоскости при падении на второй клин [18, С. 186].

В результате координаты точек наблюдения в предметной плоскости сложным образом связаны с углами поворота строчных пар клиньев сканера, которые непосредственно измеряются датчиками угла поворота привода вращения. Рассогласование обусловлено как зависимостью  $\alpha(\varphi) = 2\alpha_0 \cos(\varphi)$ , так и искривлением траекто-

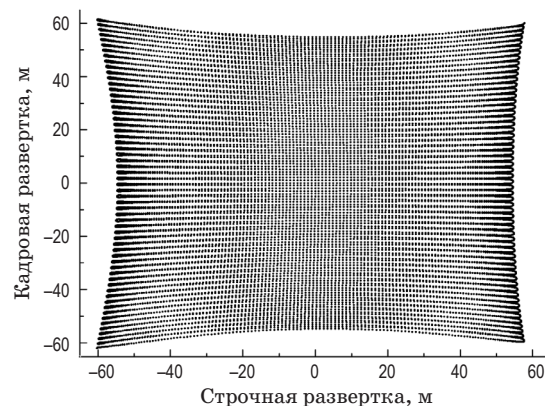


Рис. 6. Результаты расчета формы зоны сканирования сканера Рисли на дистанции 150 м. Расчетный угловой диапазон сканирования  $\pm 20^\circ$ .

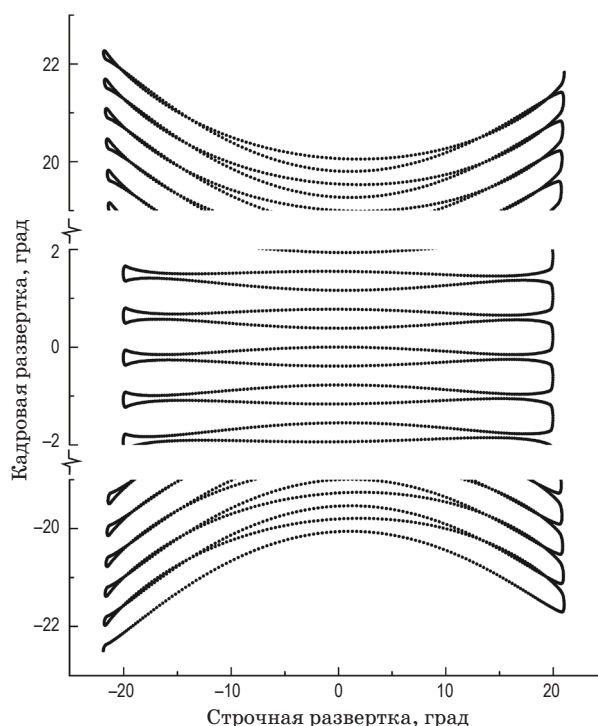


Рис. 7. Результаты расчета траекторий сканирования сканера Рисли в трех зонах раstra. Угловой диапазон сканирования  $\pm 20^\circ$ . Кадровая развертка с помощью шагового поворота кадровой пары клиньев.

рий сканирования за счет нелинейной связи угла отклонения луча и угла клина при больших углах отклонения. Коррекция этих искажений представляет собой более сложную задачу, чем в случае зеркальных сканеров, рассмотренных выше, так как траектории луча более сложные, и требуется варьирование интервала времени между импульсами, синхронизированного с углом поворота и траекторией развертки на каждом периоде строчной развертки.

Как видно из рис. 7, искривление траекторий сканирования может приводить как к уменьшению, так и к увеличению интервалов между последовательными строками вплоть до локального перекрытия строк и локального увеличения межстрочного интервала примерно вдвое. Это приводит к появлению в растре зон, в которых пятна засветки зондирующим лазером двух соседних строк полностью перекрываются, и зон, в которых засветка вообще отсутствует, т.е. теряется информация о рельефе объекта.

Обработка данных расчетов позволяет оценить долю площади, которая попадает в “мертвые зоны”. Эта доля составляет около 20% площади кадра (при этом полагается, что влияние косинусоидальной нелинейности строчной развертки компенсировано изменением интервалов между лазерными импульсами в пределах строки).

Более сложная программная коррекция координатной информации и точная синхронизация моментов излучения лазерных импульсов с расчетными углами поворота клиньев повлечет за собой существенное усложнение системы управления сканером и может быть реализована не на всех типах лазеров.

## Заключение

Из результатов проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

Каждый из трех типов сканеров, рассмотренных выше, характеризуется наличием искажений раstra сканирования наблюдаемого пространства, которые должны быть учтены в процессе обработки данных сканирования при определении координат наблюдаемой точки в пространстве предметов.

Общими для всех сканеров являются искажения, связанные с нелинейной связью поперечной координаты в плоскости наблюдения с углом поворота зондирующего пучка на выходе сканера при больших углах поля зрения системы.

Каждый из трех рассмотренных типов сканеров характеризуется наличием искажений, характерных для данного типа. Сканерам с двумя отдельными зеркалами характерны искажения, обусловленные наличием зазора между зеркалом кадровой развертки и строчным зеркалом. Для зеркала в кардановом подвесе основными являются искажения в зонах разгона

и торможения зеркал при смене направления движения. Для сканера Рисли существенны два фактора: изменение угловой скорости сканирования в пределах строки по косинусоидальному закону и нелинейная зависимость угла отклонения луча от меняющегося в процессе сканирования угла падения луча на клинья.

Проведенный анализ показал, что использование клиновых сканеров в системах с полем зрения более  $10^\circ$  нецелесообразно, так как сложно обеспечить полное перекрытие лазерным излучением наблюдаемой зоны пространства, требуется достаточно сложная коррекция координат и динамическое управление межимпульсными интервалами лазера, что не всегда возможно.

Схема сканера с призмным зеркалом также характеризуется сильными и неоднородными искажениями раstra сканирования. Само призмное зеркало имеет большую массу и габариты, сложно в изготовлении. Кроме того, при больших полях зрения имеют место существенные смещения сечения принимаемого пучка относительно центра приемного объектива в зависимости от угла наблюдения, что требует увеличения апертуры объектива.

Сканер на основе зеркала в кардановом подвесе обеспечивает практически регулярный растр сканирования в зоне вне участков торможения, поэтому программная коррекция нелинейности раstra может и не потребоваться. Основным недостатком сканера является наличие зон разгона и торможения, ограничивающее достижимые скорости строчного сканирования. Применение современных двигателей и электронного управления моментными электроприводами позволяет увеличить скорости сканирования до нескольких десятков рад/с, а использование гибридных схем ЛСС – снизить требования к значению максимальной скорости.

По указанным причинам в перспективных ЛСС, построенных по гибридной схеме, целесообразно применение сканеров на основе зеркала в кардановом подвесе.

Статья подготовлена при финансовой поддержке прикладных научных исследований Министерством образования и науки Российской Федерации (Соглашение от 08.07.2014 г. № 14.575.21.0055, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57514X0055).

\* \* \* \* \*



## ЛИТЕРАТУРА

1. Старовойтов Е.И. Бортовые лазерные локационные системы космических аппаратов: Учебное пособие. Королев: ОАО "РКК "Энергия", 2015. 120 с.
2. Pfennigbauer M., Ullrich A., do Carmo J.P. High precision, accuracy, and resolution of 3D laser scanner employing pulsed time-of-flight measurement // Proc. SPIE. 2011. V. 8037. P. 803708–803715.
3. Christian J., Hinkel H., D'Souza C., Maguire S., Patangan M. The Sensor Test for Orion ReNav Risk Mitigation (STORRM) Development Test Objective // Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf. Portland, 2011. P. 21–40.
4. do Carmo J.P., Moebius B., Pfennigbauer M., Bond R., Bakalski I., Foster M., Bellis S., Humphries M., Fisackerly R., Houdou B. Imaging LIDARs for space applications // Proc. SPIE. 2008. V. 7061. P. 70610J-1–70610J-12.
5. Dissly R.W., Weimer C., Masciarelli J., Weinberg J., Miller K.L., Rohrschneider R. Flash lidars for planetary missions // Proc. International Workshop on Instrumentation for Planetary Missions. 2012. P. 1–10.
6. Albota M.A., Aull B.F., Fouche D.G., Heinrichs R.M., Kocher D.G., Marino R.M., Mooney J.G., Newbury N.R., O'Brien M.E., Player B.E., Willard B.C., Zayhowski J.J. Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays // Lincoln Laboratory Journal. 2002. V. 13. P. 351–370.
7. Halmos M.J., Jack M., Asbrock J., Anderson C., Bailey S.L., Chapman G., Gordon E., Herning P.E., Kalisher M.H., Klaras L.F., Kosai K., Liquori V., Pines M., Randall V., Reeder R., Rosbeck J.P., Sen S., Trotta P.A., Wetzel P., Hunter A.T., Jensen J.E., DeLyon, Charlie W., Trussell T.J., Hutchinson J.A., Balcerak R.S. 3-D flash lidar at Raytheon // Proc. SPIE. 2001. V. 4377.
8. RIEGL VQ-820-G. Data sheet. 2014.
9. Kameyama S., Imaki M., Tamagawa Y., Akino Y., Hirai A., Ishimura E., Hirano Y. 3D imaging LIDAR with linear array devices: Laser, detector and ROIC // Proc. SPIE. 2009. V. 7382. P. 738209–738216.
10. Marino R.M., Davis W.R. Jr. Jigsaw: A foliage-penetrating 3D imaging laser radar system // Lincoln Laboratory Journal. 2005. V. 15. № 1. P. 23–36.
11. Грязнов Н.А., Купренюк В.И., Соснов Е.Н. Лазерная информационная система обеспечения сближения и стыковки космических аппаратов // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 5. С. 27–34.
12. Ларченко Ю.В., Леонов А.М., Жук С.М. Современные сканирующие системы на основе электромеханических дефлекторов света // Журнал Лазер-информ. 2003. № 9–10. С. 8–12.
13. Грязнов Н.А., Панталеев С.М., Иванов А.Е., Куликов Д.С. Высокопроизводительный метод измерений координат объектов в условиях космического пространства // Научно-техн. ведомости СПбГПУ. Математические методы. Моделирование. Экспериментальные исследования. 2013. № 2 (171). С. 197–202.
14. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1977. 600 с.
15. Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. 173 с.
16. Michel K., Ullrich A. Scanning time-of-flight laser sensor for rendezvous manoeuvres // Proc. 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation. 2004. P. 1–6.
17. Liadsky J. Recent advancements in commercial LIDAR mapping and imaging systems // NPS Lidar Workshop. 2007. P. 1–41.
18. Панов В.А., Кругер М.Я., Кулагин В.В., Погарев Г.В., Левинзон А.М., Долинский И.М., Михайлов Н.А., Резницкий Б.Г., Калинин М.И., Рагузин Р.М. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Л.: Машиностроение, 1980. 742 с.