

В.Г. Выскуб¹

¹ ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» Минобрнауки Российской Федерации

ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ СОСТАВНЫХ СКАНАТОРОВ

Техника оптического сканирования непрерывно развивается в направлении создания новых и совершенствования существующих типов сканаторов (дефлекторов), источников излучения, методов считывания, преобразования и воспроизведения информации. Вместе с тем отсутствие универсального сканатора, способного удовлетворить различные приложения, приводит к необходимости применения составного (комбинированного) сканирования, поиска наиболее эффективного сочетания сканаторов со взаимно дополняющими характеристиками с учетом их предельных значений. Целью работы является обзор типовых составных сканаторов, применяемых в системах широкого назначения, а также анализ имеющегося опыта использования составных сканаторов. В статье рассматриваются оптические схемы современных составных сканаторов, включающие сканаторы различных принципов действия и конструктивного исполнения. Приведен анализ комбинированных устройств, в которые вошли оптико-механические, электронные, акустооптические, электрооптические сканаторы, а также микроэлектромеханические (MEMS) системы, расширяющие сферу применения средств сканирования. Рассмотрение проведено с учетом широкого набора параметров и характеристик, таких как быстродействие, разрешение, точность управления оптическим пучком, размеры сканируемого пространства и другие. Выявлены особенности и преимущества комбинированного сканирования в части динамических, точностных, спектральных, конструктивных характеристик и функциональных возможностей, а также отмечены сложности при реализации комбинированного сканирования. Среди них вопросы оптического сопряжения, динамического, алгоритмического и точностного согласования сканаторов интегрированного устройства.

Ключевые слова: составной сканатор, оптико-механический сканатор, акустооптический дефлектор, электрооптический дефлектор, магнитоэлектрический привод, MOEMS-технология, оптическое согласование, динамические характеристики.

Введение

Поиск и распознавание объектов и явлений в ряде областей человеческой деятельности выполняется с использованием различных схем сканирования – перемещения визирной оси и пучка оптических лучей, отклоняемых в пространстве сканатором [1–3]. Сравнение сканаторов различного принципа действия показывает сложность или невозможность определения какой-то одной схемы сканирования как лучшей по всем параметрам и характеристикам. Выбор конкретного сканатора определяется его достоинствами в отношении наиболее важных характеристик для выполнения соответствующих задач и удовлетворительными для этих задач остальными характеристиками. Средством улучшения параметров и характеристик сканирования может быть сочетание различных принципов работы и схем сканаторов, т.е. использование составных конструкций. Возможные сферы применения составных сканаторов – считывание

и воспроизведение графической информации, медицина и биология, технологическая обработка материалов, дистанционное зондирование, связь.

Анализ известных технических решений

Особенности практического использования составных сканаторов и сканирующих систем можно проследить на ряде примеров.

В измерительной установке Sweepnik* лазерный луч использован для обработки фотоснимков физического эксперимента [1]. Луч отклоняется двумя зеркалами размером около 50 мм с магнитоэлектрическим приводом, а оси вращения взаимно перпендикулярны. При цене отсчета по носителю изображения 2 мкм дискретность измерения положения зеркала должна составлять около 0,1 угл. с. В числе задач установки помимо считывания координат отдельных точек снимков стоит требование осуществлять автоматическое слежение по линиям и контурам. Для выполнения его в фокусирующий

* Davies D. J. M., Frish O. R., Street G. S. B. Sweepnik: A Fast Semi-automatic Track Measurements Mashine. NIM, 1972, № 82, pp. 54–60.

канал введен дополнительный сканатор на основе вращающейся призмы Дове с астигматической оптикой, формирующей штрих-кольцо. Оптико-механические сканаторы осуществляют перемещение по плоскости носителя информации дополнительного радиального локального растра. С помощью считанного фотозлектрического сигнала от радиального растра по определенному алгоритму осуществляется выбор направления перемещения в режиме автоматического слежения по контуру (треку) и предварительная фильтрация считанной информации. Задача управления заключается в определении задающих воздействий для выполнения слежения на основе считывания данных. Оптическая схема при небольших углах отклонения сканирующих зеркал определяется размерами снимка.

Вопросы лазерного телевидения и техники дисплеев с использованием составных сканаторов развивались во многих работах, в частности в [4–7]. Такие устройства отличаются существенно разными требованиями к строчной и кадровой разверткам. Поэтому общим для ряда таких устройств является применение скоростного строчного развертывающего устройства в виде зеркальной призмы или пирамиды, а для кадровой развертки – гальванометра, что позволяет получить дисперсионную независимость. Характерным для архитектуры цветных лазерных дисплеев является пространственное разделение перед модуляцией излучений разных длин волн, создаваемых соответствующими лазерами, посредством дихроичных зеркал и оптических фильтров. Желаемый цвет изображения достигается согласованной работой модуляторов, которые в определенной точке кадра обеспечивают необходимое сочетание интенсивностей накладываемых лучей. Модулированные пучки совмещаются на одной оси и направляются на устройства горизонтальной и вертикальной зеркальных разверток с дальнейшим выводом на экран. Так, лазерное цветное телевизионное устройство с высокой разрешающей способностью [7] обеспечивало 1125 линий строчной развертки в кадре при частоте вертикальной черезстрочной развертки 30 кадров в секунду. В качестве источника света использованы аргоновый ионный и криптоновый ионный лазеры. Коэффициент пропускания оптической системы составил 0,2. Работа устройства была продемонстрирована на экране площадью 3 м² с высокой контрастностью.

Кроме обычных для монохроматических сканирующих систем задач в технике цветных дисплеев возникают задачи согласования цветовых каналов в части фокусировки и модуляции, определяющих точность воспроизведения цветных изображений. Помимо высокой скорости строчной развертки для

достижения высокой четкости требуется также ее стабильность, прямолинейность и параллельность строк. Для воспроизведения телевизионных изображений с использованием лазерного сканирующего устройства необходимо обеспечить синхронное со строчными синхроимпульсами перемещение лазерного пучка. Все это требует принятия специальных мер по стабилизации механической развертки, применения в конструкции зеркального многогранника с магнитным и газодинамическим подвесом, позволяющего достичь желаемых скоростей строчной развертки.

Расширение функциональных возможностей инерционного однозеркального двухкоординатного оптико-механического сканатора (ОЗС) было достигнуто за счет его сочетания с более быстродействующими дефлекторами. Сканатор представляет собой зеркало, закрепленное в кардановом подвесе с магнитоэлектрическим приводом. Большие размеры зеркала позволяют работать с широкими пучками, фокусировать пучок на значительном расстоянии от выходной апертуры фокусирующей системы [1]. Замкнутая по углу система управления по каждой координате с высокоточным измерителем перемещений (чувствительность ~0,1 угл. с. в диапазоне до десятка угл. град.) позволяет получить высокую точность перемещения сканирующего элемента.

Вопросы формирования составным сканатором на основе ОЗС широкой строки на плоском кадре рассмотрены в работе [8]. В составе оптической схемы использована телескопическая система, для коррекции расфокусировки в оптическую схему была включена короткофокусная линза с электроприводом, ОЗС располагалось в сходящемся световом потоке. Дополнительный магнитоэлектрический дефлектор в режиме гармонических колебаний осуществляет линейное микросканирование перпендикулярно основной строке, а высокоточное перемещение микрораstra в пределах рабочего диапазона выполняет ОЗС. Помимо приводов объектами системы управления являются также модулятор и блок подфокусировки. Применение в составном сканаторе дополнительного магнитоэлектрического дефлектора позволило получить устройство с возможностями микрораstra и быстродействием, близким к быстродействию дополнительного дефлектора. В свою очередь, ОЗС может сам по себе выполнять задачи микросканирования в составе более инерционных оптических систем.

Комбинация ОЗС с более быстродействующими дефлекторами позволяет выполнить оптическую коррекцию ошибок управления ОЗС независимо от их происхождения до значения, определяемого погрешностью дополнительного одномерного

дефлектора. Для этого возникающее рассогласование в системе управления ОЗС используется для формирования соответствующего компенсирующего воздействия на привод дополнительного дефлектора. В наиболее жестких режимах отработки переходных процессов, например воспроизведения траекторий, имеющих скачки производной, ограничения коррекции связаны с нелинейностями характеристик устройств системы управления и корректирующего дефлектора. Корректирующий дефлектор вносит в общем случае дополнительные корни в характеристическое уравнение комплексной системы и тем самым оказывает влияние на ее динамику [2]. Для выполнения коррекции постоянная времени дефлектора должна быть значительно меньше электромеханической постоянной ОЗС.

Сочетание зеркального барабана с одномерным оптико-механическим сканатором с магнитоэлектрическим приводом позволяет не только реализовать в графопостроителе планшетного типа растровый принцип развертки лазерного пучка с высокой скоростью, но и осуществить коррекцию погрешностей, вызываемых пирамидальностью призмы [9]. Величины соответствующих поправок вычисляются для каждой грани путем сканирования барабаном тестового образца и затем, во время движения зеркала, служат управляющими воздействиями для магнитоэлектрического привода кадрового отклоняющего блока. Электромеханический привод определяет необходимость стабилизации скорости вращения барабана, что обеспечивается системой управления угловой скорости электрического двигателя. Контроль углового положения барабана и зеркала сканатора выполняется прецизионными отсчетными системами, одна из которых – для строчной развертки – выполнена с использованием опорной решетки, а другая – для кадровой развертки – с использованием интерферометра. Динамический диапазон строчной развертки составляет 2^{15} , единица отсчета равна 12,5 мкм в плоскости носителя изображения. Величина единицы отсчета по координате кадровой развертки составляет 7,1 мкм. Включение или выключение луча модулятором выполняется под управлением ЭВМ по заданной программе.

Среди различных методов расширения возможностей сканаторов выделяется по эффективности сочетание сканаторов электромеханического и «электронного» привода. Такая комбинация позволяет удовлетворить разные требования по быстродействию координат сканируемого поля при высоких требованиях к разрешению. Оптико-механический сканатор может осуществлять, например, точное отклонение луча в большом диапазоне с невысоким быстродействием, а «электронный» – быстрые перемещения в небольших пределах для

коррекции параметров электромеханического сканатора и обеспечения различных режимов развертки. Такого рода корректирующими устройствами могут быть акустооптические дефлекторы (АОД) и электрооптические дефлекторы (ЭОД).

Оптические схемы комбинированных лазерных технологических сканирующих систем для микрообработки материалов формируют фокальное пятно с высокой концентрацией энергии в зоне обработки. При этом возникают задачи локального регулирования параметров лазерного нагрева. Для повышения производительности обработки важно иметь возможность регулировать мощность и частоту импульсного воздействия лазерным лучом на материалы. При построении оптической схемы необходимо учитывать обратное воздействие продуктов обработки на качество пучка. В установке [10] формирования топологии рисунка многослойной печатной платы использовано комбинированное векторное сканирование, которое выполняется гальванометрами совместно с акустооптическими дефлекторами. Дефлекторы выполняют дополнительное отклонение луча и исправляют ошибки гальванометров на участках излома траектории. В процессе ортогонального к основной траектории сканирования, выполняемого АОД, регулируя мощность излучения, можно в реальном времени изменять ширину и глубину прокладываемых трасс [11]. Предложенная архитектура позволила формировать в диэлектрике топологию проводников шириной до 10 мкм, достичь на рабочей поверхности предельных для гальванометра скоростей сканирующего элемента без ограничения на радиус поворота при сохранении повторяемости. Описанная комбинация сканаторов позволила почти на три порядка повысить быстродействие всего устройства по сравнению с системой из одних гальванометров.

В работе [12] рассмотрены различные варианты решения задачи обработки материалов ультракороткими лазерными импульсами с использованием «электронных» дефлекторов. Исследования показали, что комбинация АОД или ЭОД с гальванометром имеет большие возможности в отношении точности и скорости обработки, чем в случае однотипных дефлекторов. Предложенная комбинированная система включает АОД в качестве однокоординатного дефлектора и модулятора, а также гальванометр для сканирования по ортогональному направлению. Скорость развертки луча гальванометром составила 2 м/с, а АОД – около 26 м/с. Обработка материала производится лазерными импульсами энергией 80 нДж и длительностью 300 фс с частотой 1 МГц. Следует отметить, что хотя большая апертура АОД снижает его быстродействие, тем не менее улучшается формирование пучка, обеспечивается более высокая плотность энергии

импульса, уменьшается перекрытие импульсов и снижается влияние зон нагрева.

Для технологических применений оптического излучения в ближнем инфракрасном диапазоне в качестве возможных сочетаний могут рассматриваться, например, некоторые типы коммерческих сканаторов со взаимно дополняющими характеристиками, приведенными в следующей таблице на основании данных [13, 14].

Сочетание зеркального сканирования и электронной развертки используется в устройстве дистанционного зондирования земной поверхности. Комбинированную систему сканирования изображения образуют двухкоординатный зеркальный сканатор и матричный фотоприемник, выполняющий электронную развертку в плоскости изображения [15]. В задачу сканирующего устройства входит высокое пространственное разрешение, его адаптация к полосе обзора, спектральный анализ в широком диапазоне. Особенность конструкции сканатора – большие размеры сканирующего зеркала $430 \times 800 \text{ мм}^2$, закрепленного в кардановом подвесе, приводимого электродвигателями-маховиками. Угловой диапазон – $\pm 15^\circ$, частота сканирования – около 1 Гц. Для исправления искажений растрового изображения использована дополнительная высокоточная система контроля положением визирной линии, использующая интерференционные измерители. Угловая чувствительность контроля положения сканирующего зеркала составляет величину менее 0,05 угл. с. Необходимость комбинированного сканирования связана с тем, что сама по себе электронная развертка не в состоянии решить задачу точности, качества изображения и поля обзора в силу очень высоких требований к оптической системе и матричному фотоприемнику. Предельное разрешение оптико-электронной системы определяется предельным дифракционным разрешением объектива и размерами пикселя матричного фотоприемника. Зависимости, определяющие величины пространственного разрешения, которые могут использоваться для сопоставления этого разрешения с конструктивными параметрами современной

базы оптико-электронных систем дистанционного зондирования, а также с требованиями пользователей, приведены в [16].

В различных комбинациях сканаторов со взаимно дополняющими характеристиками нашли также применение MOEMS (Micro-Optical-Electro-Mechanical Systems) устройства. Так, в конфокальном лазерном сканирующем микроскопе [17] процесс сканирования биологического образца осуществляется совместно АОД и массивом микрозеркал DMD (Digital Micromirror Device). Цель устройства – исследование потенциалов нейронов в живой ткани мозга, что требует высокого пространственного и временного разрешения. Роль двухкоординатного АОД заключается в сканировании образца, а микрозеркал – в том, чтобы направлять флуоресцентное излучение образца в детектор. Согласованная работа сканаторов обеспечивается разработанным алгоритмом. В результате достигаются дисперсионная «развязка» сканаторов, пространственная фильтрация флуоресценции исследуемого образца, высокая световая эффективность, необходимые быстродействие и разрешение конфокального лазерного сканирующего микроскопа.

Устройство считывания голографической памяти реализовано на основе АОД и линейки микрозеркал [18]. Лазерный луч направляется АОД на микрозеркала, которые синхронно с лазерными импульсами разрешают доступ к различным ячейкам памяти, обеспечивая считывание хранящейся информации. Задачи управления сводятся к управлению микрозеркалами, которые работают в колебательном режиме, управлению углом отклонения и интенсивностью луча дефлектора. Контроллер выполняет необходимые расчеты координат микрозеркал и обеспечивает синхронизацию сканирующих устройств для необходимого углового отклонения луча. При этом время считывания страницы информации определяет быстродействие дефлектора, около 20 мкс, а доступ к пакету данных, определяемый быстродействием микрозеркал, составляет 2,5 мс.

Быстродействующие программно-перестраиваемые под воздействием управляющего электриче-

Таблица. Сканаторы со взаимно дополняющими характеристиками

Технология сканирования	ЭОД (КТН)	Гальванометры	Зеркальные барабаны	АОД
Максимальная угловая скорость, 10^3 рад/с	30	0,1–0,2	10	10–20
Временная характеристика, мкс	1	200–1000	Более 2	1
Максимальный угол отклонения, рад	0,15	1	1	0,05
Апертура, мм	0,5–1	30	30	5
Коэффициент передачи, %	90	Более 95	Более 95	85

ского поля миниатюрные дифракционные решетки, известные как GLV (Grating Light Valve) [19], в сочетании с зеркальным сканирующим устройством типа вращающегося зеркального барабана или гальванометра используются для развертки изображения. Решетки GLV образуются из микробалок пленочного типа со скоростью переключения до 20 нс, что позволяет использовать высокоскоростное построчное сканирование одной линейкой микробалок. Линейка GLV выполняет, например, модуляцию одного столбца данных изображения, который затем разворачивается электромеханическим сканирующим зеркалом в изображение дисплея. Указанное зеркало должно обеспечивать соответствующую скорость обновления, чтобы избежать заметного мерцания. Устройство управления обеспечивает цифровой и аналоговый режимы, программирование работы пикселей линейки, уровней серой шкалы, а также создание полноцветных изображений путем последовательной коммутации с высокой скоростью излучения от нескольких световых источников. Оптическая схема устройства позволяет достичь максимального использования дифракционного излучения с предельной световой эффективностью до 90%, использовать при модуляции высокую плотность мощности излучения (порядка 10^8 Вт/м²).

Дифракционный микрооптический модулятор SOM (Spatial Optical Modulator) для мобильного дисплея, разработанный компанией Samsung Electro-Mechanics [20], представляет собой массив микрзеркал, приводимых в действие пленочными пьезоприводами. Модулятор последовательно воспроизводит три основных цвета для каждого столбца изображения, которые разворачиваются в изображение кадра отдельным зеркальным сканатором. Так, для удовлетворения требований стандарта VGA 640×480 одномерный массив микрзеркал с 480 пикселями должен иметь скорость срабатывания около 150 кГц. Управление дисплеем выполняется контроллером, который обеспечивает синхронную работу лазерных источников излучения, SOM-модулятора, зеркального сканатора. Лазерные лучи трех цветов объединяются и направляются в модулятор, а затем зеркалом сканатора кадровой развертки – на плоскость изображения.

Результаты анализа

Рассмотренные устройства в составе сканаторов разных типов показывают, что возможности выбора комбинации сканаторов ограничены их предельными техническими характеристиками. Для зеркальных систем предельная разрешающая способность может достигаться реализацией потенциальных возможностей фокусирующей оптики создать на заданном поле пятно минимального

диаметра, исключением aberrаций самого сканатора путем увеличения размеров зеркала сканатора. Апертура может быть значительной, но это влечет уменьшение быстродействия, а также требует соответствующего привода. Для длин волн видимого света величина максимального разрешения, ограниченная только дифракционным пределом, может составлять 10^8 точек/см².

Преимущество зеркальных систем заключается в возможности одновременной работы в различных диапазонах спектра, высоком коэффициенте отражения, зависящем от покрытия и длины волны падающего излучения, возможности получения при соответствующей обработке сверхгладких зеркальных поверхностей со средним квадратическим значением шероховатости до 100 Å и коэффициентами отражения не менее 99% [21]. Высокая точность управления световым пучком достигается в замкнутых по углу системах с прецизионными измерителями и соответствующими законами управления. Ограничение световой мощности устройств сканирования связано с тепловой неустойчивостью оптических сред, которая зависит от длительности импульсов, параметров излучения и оптической среды. Так, стекло К8 имеет лучевую прочность 26 Дж/см². Стекло с диэлектрическим покрытием имеет лучевую прочность до 32 Дж/см² (длина волны – 1,054 мкм, длительность импульса излучения – 3 нс) [22].

Наиболее быстродействующие средства сканирования – ЭОД и АОД, фотоэлектрические матрицы. Быстродействие ЭОД ограничено временем перезаряда емкости между управляющими электродами. Существенным недостатком электрооптических сканаторов является необходимость иметь высокие управляющие напряжения при значительной мощности устройства управления. Указанное обстоятельство приводит к нагреванию кристалла, дестабилизации сканатора, уменьшению его разрешающей способности, ограничению реального быстродействия ЭОД. Погрешности отклонения пучка непрерывных электрооптических сканаторов определяются точностью поддержания высоковольтного напряжения на управляющих электродах. Световые потери в ЭОД зависят от конструкции и типа электрооптического материала. Так, оптические потери в KTN-кристалле менее 10%. Порог разрушения превышает 1 Дж/см². Область прозрачности – от 532 до 4000 нм [13]. В KTN-кристаллах имеет место деформация формы пятна в зависимости от угла отклонения и плотности энергии лазерного излучения [14].

В АОД наиболее важные параметры – разрешение, быстродействие, определяемое временем прохождения ультразвуковой волны через апертуру, и дифракционная эффективность – взаимосвязаны.

Стремление улучшить любой из них влечет ухудшение других. Физический предел увеличения апертуры, необходимого для увеличения разрешения, связан со временем установления новой частоты, т.е. быстродействием дефлектора при произвольном перемещении луча. С увеличением частоты ультразвука усиливается его затухание, что приводит к уменьшению интенсивности дифрагированного света. При работе АОД в нем возникают температурные градиенты вследствие выделения тепла в преобразователе, звуковом столбе и звукопоглотителе, что приводит к снижению разрешающей способности. В импульсном режиме имеет место хроматическая дисперсия лазерных пучков, что связано с расширением спектральной полосы частот. Зависимость эффективности дифракции от акустической мощности дает возможность управлять энергией отклоняемого луча. При линейном сканировании проявляется эффект цилиндрической линзы, что требует коррекции. Погрешность отклонения пучка определяется точностными возможностями задающего частотного генератора. Типичные значения оптического диапазона пропускания для распространенного акустооптического материала парателлурита – 530–540; 630–850; 700–1100; 1064; 1330 нм. Лучевая прочность этого кристалла – 200 МВт/см² (длина волны излучения – 1064 нм, длительность и частота импульсов – 12 нс и 1 Гц) [23].

Матричные фотоприемники (приборы с зарядовой связью – ПЗС, многоэлементные фотоприемные устройства, микроболометры и др. [3]) позволяют получить электронную развертку изображения и все изображение в целом, спектральную картину источников излучения. Быстродействие ПЗС характеризуется частотами развертки порядка мегагерц и более. Достоинствами ПЗС также являются высокая разрешающая способность, малые мощности, затрачиваемые на обработку информации. Дискретный выходной сигнал дает возможность использовать цифровые методы для обработки изображения в самом кристалле. Однако при потере чувствительности хотя бы одного из элементов строки выходит из строя вся строка развертки. Спектральный диапазон ПЗС определяется прохождением света через электроды и квантовой эффективностью применяемого материала. Так, ПЗС с барьером Шоттки обладают чувствительностью в диапазоне 1,0–5,5 мкм. Дискретность матричных фотоприемников обуславливает редукцию частот и появление частоты наложения. Временная характеристика фотоприемника должна соответствовать скорости перемещения изображения по приемнику, в противном случае может возникнуть искажение при передаче пространственных частот. Современной тенденцией развития оптико-электронных

систем дистанционного зондирования являются многодиапазонные (многоспектральные) оптико-электронные системы, работающие в видимом и инфракрасном диапазонах оптического спектра и включающие в себя соответствующие фотоприемные устройства [24].

Отсутствие универсального сканатора, способного удовлетворить различные приложения, приводит к необходимости поиска наиболее эффективной комбинации сканаторов со взаимно дополняющими характеристиками. Возможные сферы применения составных сканаторов – считывание и воспроизведение графической информации, медицина и биология, технологическая обработка материалов, дистанционное зондирование, связь. Оптимальное сочетание различных сканаторов определяется задачами конкретного приложения на основе комплекса исходных данных, относящихся к управляемому световому пучку, его параметрам. Распространенным случаем решения задачи по критерию «разрешение–быстродействие» является сочетание быстродействующего дефлектора по одной координате и более инерционного, но имеющего лучшее разрешение по другой координате, что позволяет получить в составном сканаторе выигрыш и в разрешении, и в быстродействии. В рамках этого критерия определенную ориентацию для выбора комбинаций предлагают диаграммы, приведенные в [13], обозначающие границы возможностей распространенных сканирующих устройств по разрешению и быстродействию. Микросканирование путем сочетания двух режимов: сканирование исследуемого поля сканатором с большим динамическим диапазоном и собственно микросканирование более быстродействующим сканатором с малым динамическим диапазоном – является удобным средством адаптации сканатора к обзорному полю, его объектам за счет изменения параметров микрорастра. Комбинированное сканирование может упростить пространственную фильтрацию излучения исследуемого поля, выборочное сканирование отдельных участков и тем самым увеличить отношение сигнал/шум считываемого сигнала, уменьшить избыточность информации при считывании. В ряде задач достигается упрощение разделения излучений разных длин волн, снижения световых потерь. В конфигурации электронного и электромеханического сканаторов появляется возможность быстро и в режиме реального времени компенсировать ошибку более инерционного электромеханического сканатора. Это дает возможность увеличить диапазон максимальных скоростей движения интегрированного устройства без ухудшения общей точности комбинированного сканирования. Появление MOEMS расширило возможности комбинированного сканирования.

Однако достижение преимуществ комбинированного использования сканаторов разных принципов влечет также и новые задачи, и дополнительные трудности. Сочетание сканаторов может потребовать разработки, соответствующей более сложной оптической системе устройства, предусмотреть юстировку элементов, условия их оптического согласования.

При объединении оптических пучков возникают вопросы пропускания и отражения оптического излучения с разными длинами волн, лучевой прочности оптических элементов, световой эффективности. Вопросы погрешностей отклонения пучка составным сканатором, формирования пятна, разрешения и световых потерь зависят от оптической схемы, источника излучения и требуют самостоятельного исследования.

Приводы сканаторов разного принципа отличаются энергетическими требованиями, а устройства управления при совместном применении должны быть согласованы в динамическом, точностном и алгоритмическом отношениях. В системах с обратными связями могут потребоваться различные измерительные системы. При этом устройства управления должны обеспечить работу приводов по нескольким координатам, обеспечивая заданный закон перемещения сканирующего пучка. Порой возникает необходимость в сложном механизме

синхронизации устройств. Возможно взаимовлияние сканаторов, т.е. выходной сигнал (угол отклонения, линейное перемещение) по одной координате оказывается зависимым от другой координаты. Конечное положение пучка в общем случае определяется сложной функцией углов отклонения сканаторов комплекса, что может потребовать введения дополнительных средств компенсации. В целом задача управления составным сканатором, включая управление приводами, источниками излучения, интенсивностью света, фокусировкой, контроль и устранение возникающих погрешностей, является нелинейной и многомерной.

Выводы

Составные сканаторы позволяют улучшить параметры и характеристики систем, в составе которых они работают: конструкции, размеры сканируемого пространства, пространственное разрешение и быстродействие системы, точность перемещения оптического луча, спектральный оптический диапазон, размер сканирующего пятна. В то же время при выборе типа составного сканатора необходимо учитывать особенности привода, измерительных систем, проводить сложную юстировку, обеспечивать динамическое, точностное и алгоритмическое согласование составляющих сканирующих устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерительные сканирующие приборы / В.Г. Выскуб, В.А. Канцеров, И.М. Кольцов и др.; под ред. Б.С. Розова. М.: Машиностроение, 1980. 198 с.
2. Петраков А.В., Выскуб В.Г. Высокоточные телевизионные читающие автоматы. М.: Энергоатомиздат, 2008. 576 с.
3. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2011. 568 с.
4. The HRD-1 Laser Display / Plotter. Prospect Firmes Laser Scan Limited. England, 1974, 12 p.
5. Ketabchi M., Bering M., Deter Ch. Polygonal scanner subsystem for laser display. *Optical Scanning Systems: Design and Applications*. SPIE, 1997, vol. 3131, pp. 20–29.
6. Kim Y. H, Lee H. W., Cha S. N., Lee J. H., Park Y. J., Park J. H., Hong S. S., Hwang Y. M. Full color laser projection display using Kr-Ar laser (white laser) beam scanning technology. *SPIE*, 1997, vol. 3131, pp. 2–10.
7. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений / под ред. Б. Кейзона. М.: Мир, 1979. Т. 2. 286 с.
8. Галуев С.В. Прецизионное управление оптическим пучком составными сканаторами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИФИ, 1982. 17 с.
9. Иванов А.А. Сканирующие системы для считывания и записи графической информации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Протвино: ИФВЭ, 1992. 30 с.
10. Matsumoto H., Unrath M., Kleinert J., Zhang H. Laser direct ablation for patterning printed wiring boards using ultrafast lasers and high speed beam delivery architectures. *CLEO: 2014, OSA, Technical digest (on line) (Optical society of America, 2014)*, paper ATu2L.4.
11. Unrath M., Jordens W., Ismail J., Matsumoto H., Lineburg B. Acousto-optic deflector applications in laser processing of dielectric or other materials. US patent 8,404,998 B2.
12. Heberle J., Bechtold P., Straub J., Schmidt M. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. *Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Proc. of SPIE*, 2016, vol. 9736, pp. 97360L-1–97360L-10.
13. Römer G., Bechtold P. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. *Physics Procedia*, 2014, vol. 56, pp. 29–39.
14. Bechtold P., Bauer D., Schmidt M. Beam profile deformation of fs-laser pulses during electro-optic scanning with KTN crystals. *Physics Procedia*, 2012, vol. 39, pp. 683–692.
15. Медушев С.В., Ремизов В.Е., Шичков В.В. Перспективные варианты построения программируемого двухкоординатного привода сканирующего зеркала // *Вопросы электромеханики*. 2008. Т. 107. С. 32–37.
16. Эль-Шейх Х., Якушенков Ю.Г. Пространственное разрешение бортовых оптико-электронных систем дистанционного зондирования // *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2014. № 3. С. 109–114.
17. Bansal V., Patel S., Saggau P. High-speed confocal laser scanning microscopy using acousto-optic deflectors and a digital micromirror device. *Proc. of SPIE*, 2004, vol. 5324, pp. 47–54.

18. Kiefer R., Takakura Y., Fontaine J., El Hafidi I., Montgomery P. C., Meyrueis P. Association of acousto-optic and micro-scanning mirrors for diffractive memory high speed reading. *SPIE*, 2003, vol. 4948, pp. 236–242.
19. Bloom D. M. Grating Light Valve: revolutionizing display technology, *Proc. SPIE*, vol. 3013, Projection Displays III, 165 (May 8, 1997), pp. 165–171.
20. Yun S. K., Song J. H., An S. D. et al. A novel diffractive micro-optical modulator for mobile display applications, *Proc. of SPIE*, 2008, vol. 6887, pp. 688702-1-688702-11.
21. Любарский С. В., Химич Ю. П. Оптические зеркала из нетрадиционных материалов // *Оптический журнал*. 1994. № 1. С. 76–83.
22. Разработка и исследование диэлектрических покрытий с высокой лучевой прочностью / Г. И. Бабаянц, С. Г. Гаранин, В. Г. Жупанов и др. // *Квантовая электроника*. 2005. Т. 35. № 7. С. 663–666.
23. Сайт компании «Элент А». <http://www.elent-a.net>
24. Тарасов В. В., Якушенок Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Логос, 2007. 192 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Выскуп Виктор Гаврилович, д.т.н., профессор, ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» Минобрнауки Российской Федерации, 123317, Москва, ул. Антонова-Овсеенко, д. 13, стр. 1, тел.: 8 (499) 795-18-96, 8 (965) 177-38-73, e-mail: vyskub08@mail.ru.

For citation: Vyskub V. G. Possibilities and limitations of combined scanners. Voprosy radioelektroniki, 2018, no. 5, pp. 74–82. DOI 10.21778/2218-5453-2018-5-74-82

V. G. Vyskub

POSSIBILITIES AND LIMITATIONS OF COMBINED SCANNERS

The technique of optical scanning is continuously developing in the direction of creating new and improving existing types of scanners (deflectors), radiation sources, methods of reading, converting and reproducing information. However, the absence of universal scanner, able to satisfy different applications leads to necessity of application of combined scanning, finding the most effective combination of deflectors with complementary characteristics taking into account their limit values. The purpose of this work is an overview of a typical combined of the scanners used in the systems of wide application, analysis of existing experience in the use of combined deflectors. The article discusses the optical schemes of modern combined scanners, which include scanners of different operating principles and design. The analysis of combined devices for various applications is given, which included optical-mechanical, electronic, acoustic-optical, electro-optical scanners, as well as micro-electromechanical (MEMS) systems, expanding the sphere of scanning tools. The consideration was conducted with a wide set of parameters and characteristics, such as speed, resolution, accuracy of the control of the optical beam, the size of the scanned space, etc. Identified features and benefits of the combined scanning for dynamic, precision, spectral, and structural characteristics and functionality, and also are noted difficulty in implementing a combined scanning. Among them are optical harmonization, dynamic, algorithmic and precision matching of scanners integrated into the device.

Keywords: combined scanner, optomechanical scanner, acousto-optic deflector, electro-optic deflector, magnetoelectric actuator, MOEMS-technology, optical coordination, dynamic characteristics.

REFERENCES

1. Vyskub V. G., Kantserov V. A., Koltsov I. M. et al. *Izmeritelnye skaniruyushchie pribory* [Measuring scanning devices]. In: B. S. Rozov, ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 198 p. (In Russian).
2. Petrakov A. V., Vyskub V. G. *Vysokotochnye televizionnye chitajushhie avtomaty* [Precision television reading machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2008, 576 p. (In Russian).
3. Yakushenkov Yu. G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov* [Theory and Design of optoelectronic devices]. Moscow, Logos Publ., 2011, 568 p. (In Russian).
4. The HRD-1 Laser Display. Plotter. Prospect Firms Laser Scan Limited. England, 1974, 12 p.
5. Ketabchi M., Bering M., Deter Ch. Polygonal scanner subsystem for laser display. *Optical Scanning Systems: Design and Applications. SPIE*, 1997, vol. 3131, pp. 20–29.
6. Kim Y. H., Lee H. W., Cha S. N., Lee J. H., Park Y. J., Park J. H., Hong S. S., Hwang Y. M. Full color laser projection display using Kr-Ar laser (white laser) beam scanning technology. *SPIE*, 1997, vol. 3131, pp. 2–10.
7. *Dostizheniya v tekhnike peredachi i vosproizvedeniya izobrazhenij* [Advances in technology transfer and playback of images]. In: B. Keyzon, ed. Moscow, Mir Publ., 1979, vol. 2, 286 p. (In Russian).
8. Galuev S. V. Precision control of optical beam with combined scanners: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, MIFI, 1982, 17 p. (In Russian).
9. Ivanov A. A. Scanning system for reading and recording image information: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. Protvino, IFVEH, 1992, 30 p. (In Russian).
10. Matsumoto H., Unrath M., Kleinert J., Zhang H. Laser direct ablation for patterning printed wiring boards using ultrafast lasers and high speed beam delivery architectures. *CLEO: 2014, OSA, Technical digest (on line)* (Optical society of America, 2014), paper ATu2L.4.

11. Unrath M., Jordens W., Ismail J., Matsumoto H., Lineburg B. Acousto-optic deflector applications in laser processing of dielectric or other materials. US patent 8,404,998 B2.
12. Heberle J., Bechtold P., Straub J., Schmidt M. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. *Proc. of SPIE*, 2016, vol. 9736, pp. 97360L-1–97360L-10.
13. Römer G., Bechtold P. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners. *Physics Procedia*, 2014, vol. 56, pp. 29–39.
14. Bechtold P., Bauer D., Schmidt M. Beam profile deformation of fs-laser pulses during electro-optic scanning with KTN crystals. *Physics Procedia*, 2012, vol. 39, pp. 683–692.
15. Medushev S. V., Remizov V. E., Shichkov V. V. Promising options for building a programmable two-coordinate drive of the scanning mirror. *Voprosy elektromekhaniki*, 2008, vol. 107, pp. 32–37 (In Russian).
16. El-Sheikh Kh., Yakushenkov Yu. G. The spatial resolution of the optical electronic remote sensing systems. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka*, 2014, no. 3, pp. 109–114 (In Russian).
17. Bansal V., Patel S., Saggau P. High-speed confocal laser scanning microscopy using acousto-optic deflectors and a digital micromirror device. *Proc. of SPIE*, 2004, vol. 5324, pp. 47–54.
18. Kiefer R., Takakura Y., Fontaine J., El Hafidi I., Montgomery P. C., Meyrueis P. Association of acousto-optic and micro-scanning mirrors for diffractive memory high speed reading. *SPIE*, 2003, vol. 4948, pp. 236–242.
19. Bloom D. M. Grating Light Valve: revolutionizing display technology, *Proc. of SPIE*, vol. 3013, Projection Displays III, 165 (May 8, 1997), pp. 165–171.
20. Yun S. K., Song J. H., An S. D. et al. A novel diffractive micro-optical modulator for mobile display applications, *Proc. of SPIE*, 2008, vol. 6887, pp. 688702-1–688702-11.
21. Lyubarskiy S. V., Himich Yu. P. Optical mirrors made from unconventional materials. *Opticheskij zhurnal*, 1994, no. 1, pp. 76–83 (In Russian).
22. Babayanc G. I., Garanin S. G., Zhupanov V. G. et al. The development and study of dielectric coatings with high beam strength. *Kvantovaya elektronika*, 2005, vol. 35, no. 7, pp. 663–666 (In Russian).
23. Sajt kompanii «Ehlent A» (In Russian). <http://www.elent-a.net>
24. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Dvukh- i mnogodiapazonnye optiko-elektronnye sistemy s matrichnymi priemnikami izlucheniya* [Two and multi-band optoelectronic systems with matrix receivers]. Moscow, Logos Publ., 2007, 192 p. (In Russian).

AUTHOR

Vyskub Viktor, Dr, Scientific Research Institute – Federal Research Center for Project Evaluation and Consulting Services, 13/1, ulitsa Antonova-Ovseenko, Moscow, 123317, tel.: +7 (499) 795-18-96, +7 (965) 177-38-73, e-mail: vyskub08@mail.ru.