

УДК 623.544:681.78

А. М. Липанов, доктор технических наук, академик РАН;
Ю. К. Шелковников, доктор технических наук, профессор;
Институт прикладной механики Уральского отделения РАН
А. В. Алиев, доктор физико-математических наук, профессор;
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
Н. И. Осипов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт прикладной механики Уральского отделения РАН

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫЙ СКАНИСТОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрено применение оптико-электронных систем на основе сканистора для измерения угловых перемещений объектов при работе в условиях световых помех и шумов. Получены выражения для выходных токов и напряжений видеосигнала со сканистора при его работе с амплитудно-модулированными световыми сигналами во время-импульсном и фотопотенциометрическом режимах. Дан анализ работы помехозащищенных коллиматорного и автоколлиматорного сканисторных измерителей угловых перемещений объектов.

Ключевые слова: телевизионный сканистор, видеосигнал, световые зоны, непрямолинейность, оптико-электронная система

В настоящее время актуальной задачей является разработка прецизионной оптико-электронной системы (ОЭС) для контроля угловых перемещений объектов (в частности, упругих колебаний ствольных труб /СТ/, колебаний качающейся части пусковой установки метеорологических и исследовательских ракет [1] и т. д.). Широкое применение ОЭС в автоматических системах управления объясняется надежностью их работы, простотой схем включения, компактностью, высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками. Требованиям измерений угловых перемещений объектов наиболее полно удовлетворяет ОЭС, в которой пространственное положение объекта представляется зеркальной поверхностью пассивного отражательного элемента (дефлектора), а в основу работы положен принцип оптической локации. Используется коллимационная (или автоколлимационная) схема построения ОЭС, когда посылаемый на дефлектор световой поток имеет пространственную ориентацию (принимаемую за опорное положение объекта), а отраженный от дефлектора световой эхо-сигнал несет информацию об изменении угла (равного угловому отклонению зеркала).

Для дистанционного измерения углов приемно-передающее устройство ОЭС устанавливается на неподвижном основании, а дефлектор – на объекте. Передающий блок формирует направленный на дефлектор зондирующий световой поток и содержит излучатель и оптику с диафрагмирующими элементами. Приемный блок с помощью оптической системы обеспечивает информационную связь дефлектора с координатно-чувствительным фотоприемником, а также выделение и обработку видеoinформации электронной схемой. Приемный и передающий блоки должны быть согласованы по характеристикам и конструктивно могут быть выполнены автономными (коллимационными) или совмещенными (автоколлимационными). Коллимационная схема построения целесообразна, когда необходимо получить более высокую (в четыре

раза) освещенность световой зоны на координатно-чувствительном фотоприемнике (за счет отсутствия светоделительной призмы между источником излучения и объективом). Однако измерители, выполненные по автоколлимационной схеме, обладают большей простотой юстировки, меньшими габаритами и искажениями оптической системы.

Следует отметить, что фотоприемник ОЭС определяет ее метрологические и эксплуатационные характеристики, простоту реализации, габариты и надежность работы. Из координатно-чувствительных фотоприемников наилучшими точностными характеристиками обладают полупроводниковые аналоги передающей телевизионной трубки – сплошные сканисторы (мгновенного действия) и дискретные приборы с зарядовой связью (с накоплением заряда). В сравнении с приборами с зарядовой связью телевизионный сканистор имеет более высокие координатное разрешение и механическую прочность, значительно более широкий энергетический диапазон, возможность прямого детектирования оптического сигнала (без накопления заряда), более простые технологии изготовления и схемотехническое обрамление для преобразования оптического сигнала в электрический (аналоговый или цифровой), сохранение работоспособности после воздействия ионизирующих излучений. Использование телевизионного сканистора в измерителях угловых перемещений (ИУП) объектов обеспечивает простоту технической реализации и эксплуатации устройства, высокие метрологические характеристики, малые габариты и массу приемно-передающего блока. Прямое детектирование оптического сигнала, дающее возможность осуществлять его амплитудную модуляцию, позволяет реализовать высокую помехозащищенность и достаточную надежность работы измерителя. При этом (благодаря широкому энергетическому диапазону сканистора и его линейной люкс-амперной характеристике) обеспечивается нормальное функционирование измерителя при фоновых световых помехах до $\sim 8 \cdot 10^4$ лк.

ИУП должны иметь необходимые технические характеристики при наличии световых помех различного происхождения. Достоинством времяимпульсных сканисторных измерителей является их достаточно высокая помехозащищенность, связанная с тем, что при последовательном опросе фотодиодных ячеек и формировании видеосигнала может восприниматься лишь незначительная часть этих помех, распределенных вдоль фоточувствительной поверхности сканистора. Увеличение помехозащищенности ИУП при его работе в реальных условиях, сопровождающихся световыми помехами в угловом поле приемного блока (фоновыми помехами), достигается спектральной селекцией информационного светового потока, осуществляемой согласованием спектральных характеристик сканистора и источника излучения.

Следует отметить, что модуляцию оптического сигнала применяют в случаях, когда необходимо отделить полезную информационную часть сигнала от помех как случайного, так и закономерного характера. Сканисторные телевизионные структуры позволяют работать в широком, превышающем 80 дБ, динамическом диапазоне интенсивностей световых сигналов. Частотный диапазон чувствительности сканистора к изменениям интенсивности светового потока также значителен (100 кГц и более). Это позволяет выделять полезные оптические сигналы в условиях интенсивных световых помех посредством модуляции полезного оптического сигнала с высокой частотой. Суть применения модуляции состоит в переносе спектра полезного оптического сигнала (связанного с измеряемым параметром объекта) в область высоких частот, усиления в соответствующей узкой полосе частот и возврате спектра сигнала в низкочастотную область (при детектировании амплитудным детектором и последующей фильтрации фильтром низких частот). При этом полосовой усилитель выделяет только информационную световую составляющую выходного тока сканистора с частотой модуляции и подавляет составляющую от темнового тока и световых помех (частотный диапазон изменения амплитуды которых находится вне полосы пропускания полосового усилителя). Максимальная частота модуляции оптического сигнала ограничена частотными свойствами сканисторной структуры к облучению, а минимальная частота среза F_S – допустимыми искажениями огибающей измеряемого сигнала и требованиями к качеству фильтрации.

В качестве амплитудно-модулированных источников излучения могут быть применены светоизлучающие диоды (СИД), лазерные диоды, малогабаритные газовые лазеры, а также тепловые источники излучения с механическими или электрооптическими модуляторами. Наиболее пригодными источниками излучения, в большинстве случаев, можно считать СИД, которые просты в управлении, обладают достаточной мощностью и спектром излучения, близким спектру фоточувствительности сканистора практически линейной зависимостью между управ-

ляющим током и выходным оптическим сигналом в широком диапазоне значений тока инжекции, широкой (до 200 мГц) полосой модулирующих частот. Лазерные диоды, как источники модулированного излучения, характеризуются на порядок большей мощностью и узким спектром излучения, малой расходимостью пучка света и когерентностью оптического излучения, очень высокой (до 2 гГц) полосой модулирующих частот. Однако они имеют нелинейную характеристику излучения на выходе от рабочего тока, критичны к температурным условиям, ухудшают свойства в процессе старения, а также сложны в управлении. Другие источники излучения (лампы накаливания с механическими или электрооптическими модуляторами) из-за сложности управления, больших габаритов и низкой надежности применяются реже.

Модулирующий генератор, в случае применения СИД в качестве источника излучения, обычно представляет собой генератор синусоидального напряжения. В качестве преобразователя «ток – напряжение» сканисторной структуры в большинстве случаев наилучшим является применение современных операционных усилителей с входным каскадом на полевых транзисторах, позволяющих обеспечить близкое к нулю входное сопротивление и низкий уровень шума. Полосовые фильтры с необходимыми параметрами – средней частотой $f_0 = f_m$, полосой пропускания $2\Delta f = 2F_S$ и коэффициентом усиления k_v и фильтры низких частот с частотой среза F_S также успешно реализуются по схемам активных RC-фильтров на основе операционных усилителей.

Амплитудный детектор может быть применен как обычный, так и синхронный. При большом соотношении сигнала к шуму обычный амплитудный детектор почти не проигрывает синхронному в помехоустойчивости. Применение синхронного детектирования обеспечивает более высокие помехоустойчивость и точностные характеристики при низких или изменяющихся уровнях полезного сигнала, так как синфазный с модулирующей частотой полезный (информационный) сигнал детектируется полностью, а сигнал помехи со случайной фазой – лишь частично. При интегрировании демодулированного сигнала фильтром низких частот производится синхронное накопление полезного сигнала, которое позволяет увеличить отношение сигнал – шум без увеличения мощности полезного сигнала. Формирователь измерительных импульсов завершает процесс обработки оптического сигнала, и его содержание зависит от решаемых измерительным устройством задач.

В условиях сильных световых помех эти требования наиболее эффективно могут быть обеспечены структурной схемой коллиматора с времяимпульсным режимом работы сканистора и модуляцией по яркости светового потока. В таком измерителе в момент времени $t_x = t_{\phi}$, соответствующий середине x (рис. 1, а) световой зоны (как узкой, так и широкой) с равномерной освещенностью, в токе сканистора

(рис. 1, *в*) появляется точка фазового перехода, в которой световые токи насыщения элементарных фотодиодных ячеек сканиstorной структуры меняют свое направление на обратное относительно суммарного темнового тока [2]. Эта особенность работы сканистора с амплитудно-модулированными световыми потоками использована в ИУП, представленном на рис. 2. Момент фазового перехода, соответствующий моменту перехода через нуль огибающей фототока сканистора на выходе ФНЧ (рис. 1, *з*), выделяется с помощью блока выделения видеоимпульса БВВИ. Так как, согласно [2], погрешность изменения пространственной координаты x от нестабильности светового потока увеличивается при использовании для измерения более высоких производных тока сканистора, то данный ИУП (рис. 2), не требующий дифференцирования тока сканистора, дает возможность дополнительно повысить точность измерений. Он позволяет работать при очень слабых световых полях и снизить допустимое отношение G сигнал/шум от 30 (при немодулированном световом потоке) на несколько порядков (при модулированном) без изменения точности регистрации измеряемых координат объектов.

Сканиstorный ИУП работает следующим образом. Дефлектор, выполненный в виде плоского металлического зеркала 3, устанавливается на конце

СТ, а оптический блок ОБ закрепляется на неподвижном основании таким образом, чтобы пучок параллельных лучей от модулированного по яркости источника излучения ИИ, проходящий через передающую линзу, попадал на зеркало и отражался от него на приемную линзу, в фокальной плоскости которой расположены сканиstorы СК1, СК2 (сканиstor СК1 /СК2/ расположен горизонтально /вертикально/ и измеряет перемещение луча в горизонтальной /вертикальной/ плоскости). Для выделения перемещений по одной координате применены цилиндрические линзы ЦЛ1, ЦЛ2, в фокальных плоскостях которых расположены сканиstorы, а для разделения луча на две составляющие – светоделительная призма СП.

Приемный оптический тракт представляет собой систему фокусирующего типа, где отраженные от зеркала 3 параллельные лучи собираются в одних и тех же точках, в центре фоточувствительных поверхностей сканиstorов СК1, СК2 при параллельных перемещениях зеркала, и собираются, соответственно, в других точках этих поверхностей при угловых перемещениях зеркала; при этом линейные смещения этих световых точек по горизонтальному и вертикальному сканиstorам пропорциональны соответствующим угловым перемещениям зеркала и фокусному расстоянию приемно-передающей линзы.

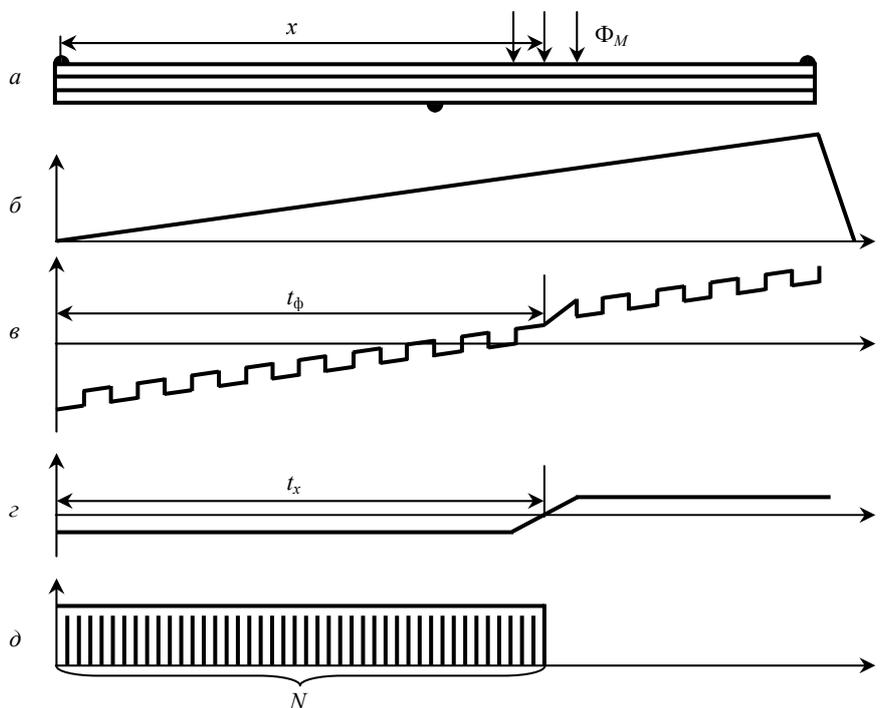


Рис. 1. Временные диаграммы сканиstorного ИУП во времяимпульсном режиме при работе с модулированными световыми потоками

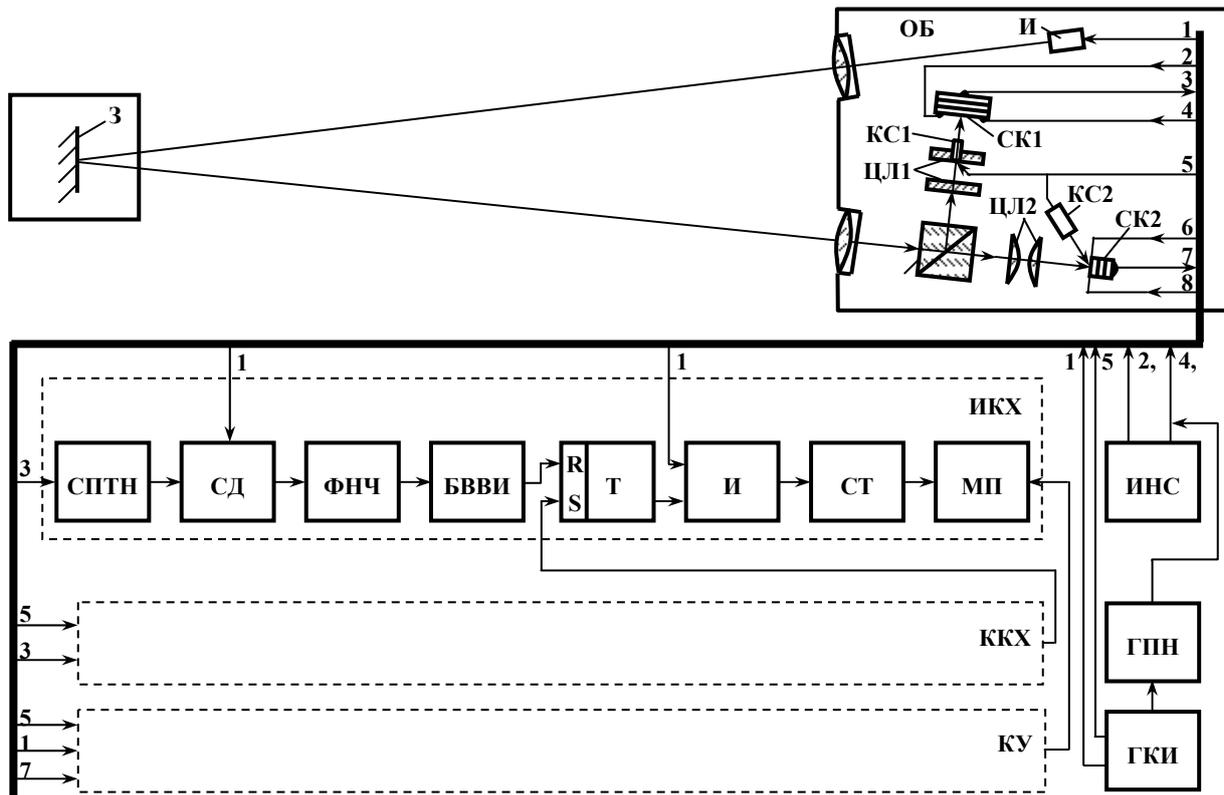


Рис. 2. Структурная схема коллиimatorного ИУП с времяимпульсным режимом работы сканистора

Выделяемая в горизонтальном (вертикальном) измерительном канале ИКХ (ИКУ) при опросе сканистора СК1 (СК2) информационная составляющая тока коллектора через селективный преобразователь ток-напряжение СПТН, синхронный детектор СД, фильтр нижних частот ФНЧ поступает в блок выделения видеоимпульса БВВИ, при этом длительность временного интервала от начала опроса до момента возникновения видеоимпульса пропорциональна расстоянию световой зоны от конца сканистора. Долговременная стабильность координатной характеристики сканисторов в ИУП обеспечивается их автоматической калибровкой по горизонтальному (вертикальному) каналу ККХ (ККУ) на основе калибровочного светодиода КС1 (КС2), расположенного около сканистора СК1 (СК2). В исходном состоянии (когда нет угловых изменений) информационный световой поток, отраженный от зеркала З, и световой поток от КС1 (КС2) попеременно формируют световую зону в середине фоточувствительной поверхности сканистора СК1 (СК2). При изменении угла информационная световая зона смещается от своего первоначального нулевого положения и триггер Т формирует видеоимпульс с длительностью, пропорциональной отклонению информационной световой зоны от неподвижной калибровочной, который через схему И и счетчик импульсов СТ подается на микропроцессор МП.

Информационная высокочастотная составляющая I_m^* тока нагрузки на выходе СПТН от спроецированного на сканистор коллимационного пучка шириной от x_1 до x_2 описывается, согласно [2], выражением:

$$I_m^* = (j_{fk} + j_{fs}) \frac{b \cdot l (1 + \cos 2\pi \nu_0 t)}{4\alpha E_0} \times \ln \left[\frac{\exp \alpha (E_s - E_k) + 1}{\exp \alpha (E_s - E_k)} \right] \Big|_0^l + (j_{fk} - j_{fs}) \frac{b \cdot (x_2 - x_1) (1 + \cos 2\pi \nu_0 t)}{4}, \quad (1)$$

где b, l – ширина и длина сканистора соответственно; $\alpha = \left(A \frac{KT^\circ}{q} \right)^{-1}$; K – постоянная Больцмана; q – заряд электрона; A – коэффициент, отражающий степень неидеальности $p-n$ -перехода сканисторной структуры; T° – температура в градусах Кельвина; $E_s = E_0 \frac{x_0}{l}$ – потенциал эмиттера в точке опроса x_0 ; E_0 – постоянное напряжение смещения эмиттера; $E_k = E_0 \frac{t_0}{T}$ – значение пилообразного напряжения в момент опроса t_0 ; T – период пилообразного напряжения; j_{fk}, j_{fs} – соответственно приращения тока насыщения фотодиодов база-коллектор и эмиттер-база при освещении; x_1, x_2 – координаты начала и конца световой зоны на сканистере.

Следует отметить, что наряду с широкими функциональными возможностями времяимпульсный режим работы сканистора характеризуется недостаточно высокой скоростью определения координат. Частота опроса ограничена конечным временем пе-

резаряда барьерных емкостей p - n -переходов сканистора в процессе сканирования (при обратном ходе развертывающего напряжения для восстановления начальных условий также необходим их обратный перезаряд).

Кроме того, в этом режиме невозможен непрерывный контроль (слежение) координаты объекта. Фотопотенциометрический же режим работы сканистора используется для непрерывного определения линейной координаты одиночной световой зоны на его фоточувствительной поверхности (которая формируется отраженным от зеркала информационным световым потоком). Отсутствие периодической развертки при фотопотенциометрическом режиме сокращает время на перезаряд барьерных емкостей освещенных и неосвещенных p - n -переходов сканистора, что позволяет увеличить быстродействие и непрерывность измерения координаты объекта. Влияние световых помех, увеличивающих погрешность измерений, уменьшается применением амплитудной модуляции светового сигнала. При этом сигналы управления положением нулевой эквипотенциали сканистора [3] формируют из переменной составляющей его выходного фототока на частоте модуляции путем их фильтрации полосовым фильтром, использования синхронного детектирования и сглаживания интегратором. Кроме составляющих выходного тока, вызванных световыми помехами (с частотами вне полосы пропускания полосового усилителя), одновременно ослабляется составляющая от темновых токов p - n -переходов сканистора. Максимальная частота модуляции оптического сигнала зависит от фотоэлектрического быстродействия сканистора, определяемого временем установления фототока τ_{yc} при воздействии прямоугольного импульса света (для сплошного сканистора $\tau_{yc} = 10^{-6} \dots 10^{-7}$ сек). Скорость изменения напряжения управления положением эквипотенциали сканистора ограничена коммутационным быстродействием (необходимым минимальным временем переключения $t_{пер}$ элементарной эквивалентной пары p - n -переходов, в зависимости от освещенности оцениваемого величиной $t_{пер} = 10^{-4} \dots 10^{-6}$ сек). Это накладывает ограничения снизу на ширину полосы пропускания полосового фильтра и на постоянную времени интегратора. В целом, применение фотопотенциометрического режима работы сканистора позволяет примерно на порядок увеличить быстродействие измерений координат объекта по сравнению с времяимпульсным режимом.

Структурная схема автоколлиматорного ИУП с фотопотенциометрическим режимом работы сканистора [3] представлена на рис. 3 (где СК1, СК2 – сканисторы; ПТН_X, ПТН_Y – преобразователи тока напряжения; ПФ_X, ПФ_Y – полосовые фильтры; СД_X, СД_Y – синхронные детекторы; ИНТ_X, ИНТ_Y – интеграторы; БУЭ_X, БУЭ_Y – блоки управления эквипотенциально сканистора; АЦП_X, АЦП_Y – аналогоцифровые преобразователи; ГМН – модуляционный

генератор; МП – микропроцессор; РУ – регистрирующее устройство).

Работа электронного блока канала ИКХ ИУП заключается в следующем. Отраженный от зеркала и модулированный по интенсивности (частота модуляции задается генератором ГМН) информационный световой поток проецируется на сканистор СК1. К резистивной делительной шине сканистора СК1 от блока БУЭ_X подведено постоянное напряжение смещения E_0 и напряжение управления u_x координатой нулевой эквипотенциали (координатой x , в которой пара встречно включенных p - n -переходов находится под нулевым напряжением).

Информационная переменная составляющая выходного фототока сканистора (с амплитудой, пропорциональной разности сумм фототоков фотодиодов его p - n -структуры, расположенных по обе стороны от положения нулевой эквипотенциали) описывается выражением:

$$\Delta I(x_i) = k_1 \int_0^{x_i} \Phi^I(x) dx - k_2 \int_{x_i}^l \Phi^{II}(x) dx, \quad (2)$$

где k_1 , k_2 , $\Phi^I(x)$, $\Phi^{II}(x)$ – соответственно коэффициенты фоточувствительности и освещенности эмиттерного и коллекторного p - n -переходов сканистора; x_i и l – текущая линейная координата нулевой эквипотенциали и длина сканистора. Пропорциональное информационной составляющей напряжение с выхода ПТН_X после фильтрации полосовым фильтром ПФ_X с центральной частотой $f_{мод}$ и демодуляции синхронным детектором СД_X поступает на вход интегратора ИНТ_X. Изменяющееся выходное напряжение интегратора изменяет положение нулевой эквипотенциали до момента равенства фототоков по обе стороны. При этом установившееся на выходе интегратора напряжение

$$u_x = \frac{1}{C} \int_0^{t_k} \left[k_1 \int_0^{x_i} \Phi^I(x) dx - k_2 \int_{x_i}^l \Phi^{II}(x) dx \right] dt, \quad (3)$$

(где C – емкость конденсатора интегратора) определяет координату x_c центра световой зоны относительно середины фоточувствительной поверхности сканистора:

$$x_c = \frac{u_x}{2E_0} l. \quad (4)$$

Переключение источников модулированного излучения (ИИ и КС1) с одного на другой вызывает изменение напряжения на выходе интегратора ИНТ_X от значения $U_x^{инф}$ (соответствующего координате подвижной информационной световой зоны) до величины $U_x^{кал}$ (соответствующей координате центра неподвижной калибровочной световой зоны). Это изменяющееся выходное напряжение интегратора ИНТ_X через аналого-цифровой преобразователь АЦП_X поступает в микропроцессор МП и регистрирующее устройство РУ. Аналогично работает измерительный канал ИКУ.

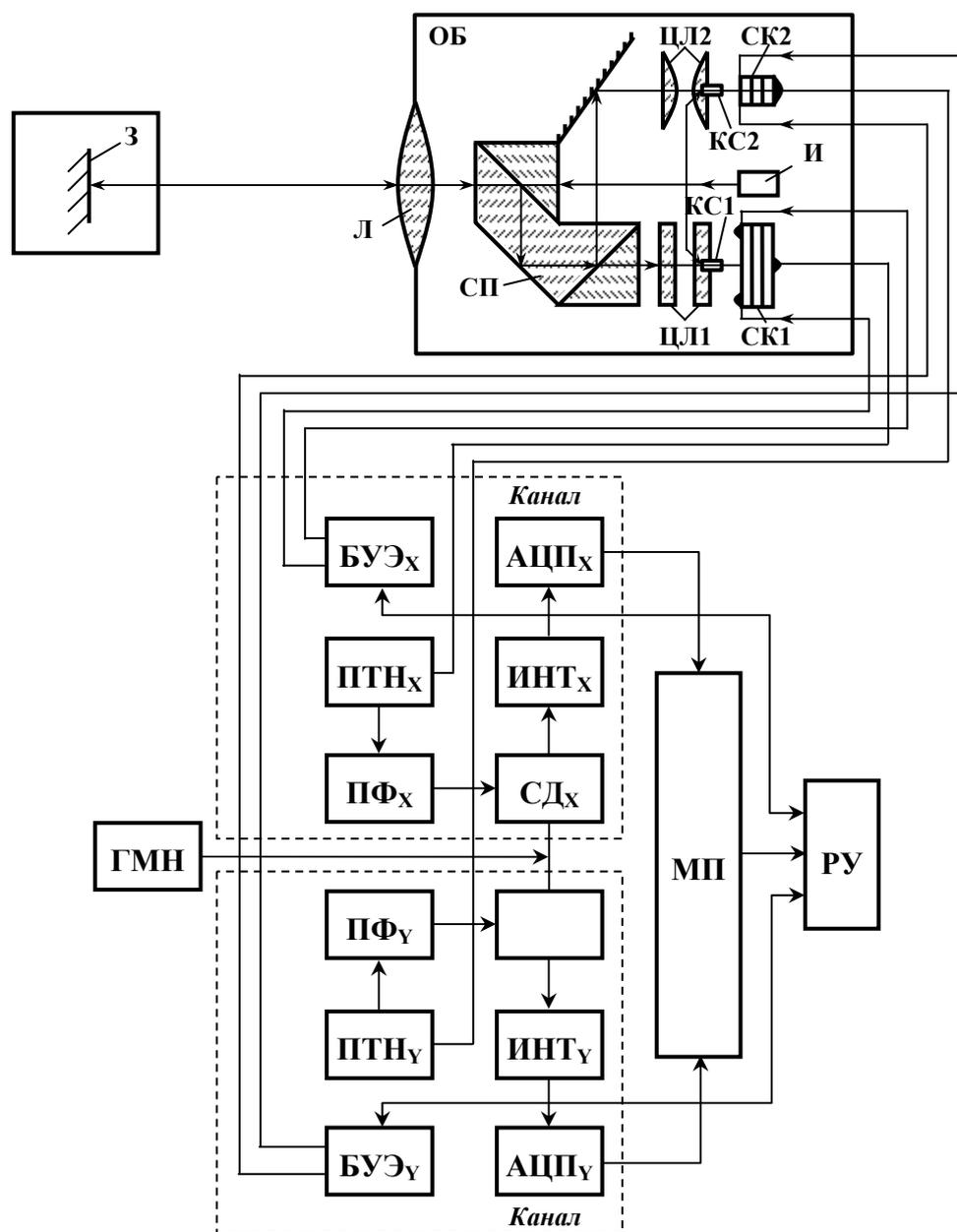


Рис. 3. Структурная схема автоколлиматорного ИУП с фотопотенциметрическим режимом работы сканистора

Точность измерений перемещений информационной световой зоны относительно калибровочной при применении сканистора со сплошной структурой ограничена нелинейностью его координатной характеристики (которая, в основном, обусловлена продольной неравномерностью сопротивления делительных шин сканистора (0,5...3 %)). В качестве источников излучения могут быть применены светодиоды инфракрасного диапазона АЛ-119 со спектром излучения, близким спектру фоточувствительности сканистора, линейной зависимостью между управляющим током и выходным оптическим сигналом, широкой полосой модулирующих частот. Рациональные значения частоты модуляции источника излучения, полосы пропускания полосового фильтра и постоянной времени интегратора для ска-

нистора длиной $L = 20$ мм, при напряжении смещения делителя $E_0 = 20$ В, составляют, соответственно, $f_{\text{мод}} = (0,5-1)$ мГц, $2\Delta f = (50-100)$ кГц и $t_{\text{инт}} = (0,1-0,2)$ мс. Следует отметить, что применение фотопотенциметрического режима работы в сканисторном ИУП позволяет примерно на порядок увеличить быстродействие измерений изменений угловых перемещений по сравнению с времяимпульсным режимом.

В целом в условиях сильных световых помех применение сканистора обеспечивает простоту технической реализации, высокие метрологические характеристики, малые габариты и массу приемно-передающего блока. Применение модуляции светового сигнала позволяет уменьшить погрешность измерений параметров световых потоков, обусловленных нерав-

номерностью темновых токов фотодиодов вдоль сканистора при слабых уровнях световых сигналов, а также в случае интенсивных световых помех.

Библиографические ссылки

1. Липанов А. М., Шелковников Ю. К. Использование телевизионного сканистора в технике двойного применения // Изв. РАН. – 2005. – № 2. – С. 71–75.

2. Шелковников Ю. К., Липанов А. М. Теоретические основы и технология изготовления телевизионных сканисторных структур. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 144 с.

3. Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И., Кизнерцев С. Р. Устройство для измерения размеров объектов : патент РФ № 2348900. – 2009.

* * *

A. M. Lipanov, DSc in Engineering, Academician, Institute of Applied Mechanics of the Ural branch of the RAS
Yu. K. Shelkovnikov, DSc in Engineering, Professor, Institute of Applied Mechanics of the Ural branch of the RAS
A. V. Aliev, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
N. I. Osipov, PhD in Engineering, Senior Researcher, Institute of Applied Mechanics of the Ural branch of the RAS

Noise-free scanistor meter for the angular movements of the objects

The paper considers the application of optical-electronic systems based on the scanistor to measure angular displacement of objects working at light interferences and noises. Expressions are obtained for output currents and voltages of the scanistor video signal when operating with amplitude-modulated light signals in the time-pulse and photo-potentiometric modes. The analysis of noise-proof collimator and self-collimator scanistor meters of object angular displacements is given.

Keywords: television scanistor, video signal, light zones, misalignment, optical-electronic system

Получено: 22.10.12

УДК 623.544:681.78

A. M. Липанов, доктор технических наук, академик РАН;
Ю. К. Шелковников, доктор технических наук, профессор
 Институт прикладной механики Уральского отделения РАН
A. В. Алиев, доктор физико-математических наук, профессор;
К. В. Сермягин, аспирант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СКАНИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ НЕПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ СТВОЛЬНЫХ ТРУБ

Рассмотрены основные свойства, режим работы и схема включения телевизионного сканистора как бесконтактного датчика измерительной информации в устройствах для измерения непрямолинейности ствольных труб. Определены условия и необходимые преобразования видеосигнала со сканистора для измерения временного местоположения его характерных точек, по которым определяются координаты световых зон. Исследованы физические особенности работы сканистора, с их учетом получены выражения для ошибки определения измеряемой координаты.

Ключевые слова: сканисторный измеритель, угловые перемещения, видеосигнал, амплитудная модуляция

Высокие метрологические характеристики, отсутствие механического контакта с измеряемым объектом, небольшие габариты и высокая надежность наряду с широкими возможностями предварительной обработки оптической информации позволяют использовать оптико-электронные системы (ОЭС) в различных областях техники и научных исследованиях.

Разработка прецизионной ОЭС для контроля распределения кривизны ствольной трубы (СТ) по ее длине позволит внедрить использование норм кривизны в технологический цикл изготовления СТ и повысить объективность приемо-сдаточных испытаний при их проведении по вычисленному паспортному значению кривизны. При этом кривизна $K(x)$ действительной оси канала трубы, как геометриче-

ского места центров его поперечных сечений, определяется выражением

$$K(x) = \frac{1}{R(x)} = \frac{H''(x)}{\left\{1 + [H'(x)]^2\right\}^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

где $R(x)$ – радиус кривизны; $H(x)$ – непрямолинейность, характеризующаяся линейными отклонениями действительной оси канала СТ от его теоретической оси.

Измерение кривизны действительной оси канала СТ могут быть произведены:

– методом нивелирования, основанным на измерении непрямолинейности;