

Физическая аппаратура

УДК 681.7.014.3

Сравнение вариантов сканирования в тепловизорах 2-го поколения

Р. М. Алеев, Р. А. Насибуллин
 ЗАО «НПФ "ОПТООЙЛ"», г. Казань, Россия

Сравниваются два варианта сканирования в тепловизорах (ТВП) 2-го поколения: "треугольный" и "пилообразный" законы изменения углового положения сканирующего зеркала (СЗ) во времени. Рассмотрены особенности технической реализации получения тепловизионного изображения в двух вариантах сканирования. Выявлены параметры сканирующего движения, наиболее существенно влияющие на формирование тепловизионного изображения, и на их основе проведен математический анализ влияния вариантов сканирования на качество изображения.

В ТВП 2-го поколения, если рассматривать в обратном ходе оптических лучей, проекция многогорядной линейки сканирует предметную область с помощью СЗ. Для получения высокого КПД сканирования и малых габаритов сканирующего устройства в ТВП 2-го поколения предпочтительно использовать привод с колебательным движением зеркала в ограниченном углу. В этом случае возможны два варианта сканирования (рис. 1.)

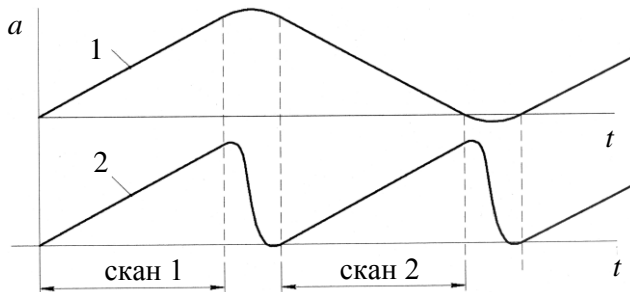


Рис. 1. Законы изменения угла сканирующего зеркала:
 1 — "треугольный"; 2 — "пилообразный"

Первый вариант движения зеркала называют "треугольным", а второй — пилообразным или "пилой". Из рис. 1 понятно, что изображение в первом варианте сканирования формируется кадрами (или полукадрами), полученными движением СЗ в разных направлениях. При формировании тепловизионных изображений из кадров или полук кадров, полученных движением СЗ в разных направлениях, возникают непреодолимые трудности, в конечном итоге ухудшающие основной параметр тепловизионного прибора — минимально разрешаемую разность температур. При сканировании "пилой" кадры тепловизионного изображения получают сканированием в одном направлении.

Рассмотрим достоинства и недостатки этих вариантов сканирования с позиций степени влияния

на тепловизионное изображение, энергопотребление и стоимости.

Оценка получаемого тепловизионного изображения

Как и любое другое звено, участвующее в формировании изображения, характеристики сканера и параметры движения СЗ оказывают влияние на параметры эффективности ТВП [1]. На изображение оказывает влияние отклонение скорости СЗ от номинального значения, отклонение углового положения СЗ от скана к скану, точностные характеристики датчика углового положения (ДУП) сканера, участвующего в синхронизации выборок сигналов в систему фотоприемных устройств (СФПУ).

Отклонение углового положения СЗ от скана к скану, а также случайные ошибки ДУП могут быть представлены в виде геометрической шумовой составляющей в изображении [1] и определяют тем самым пространственное разрешение. Величина повторяемости не зависит от варианта реализации закона сканирования, а определяется характеристиками сканера, системы управления сканером и внешними возмущениями.

Влияние неравномерности движения СЗ рассмотрим для двух вариантов выборок сигналов из СФПУ. Первый вариант выборок осуществляется через равные промежутки времени независимо от отклонения скорости СЗ. Привязка к угловому положению СЗ осуществляется импульсом, формируемым ДУП в начале участка сканирования, который является запускающим процесс выборки сигналов. Второй — осуществляется синхроимпульсами (СИ) с ДУП сканера, представляющего собой инкрементальный энкодер. Синхроимпульсы формируются через угловые промежутки, равные элементарному полю зрения.

Вариант выборки сигналов СФПУ без привязки к СЗ

В этом варианте выборки отклонение скорости СЗ приводит к искажению пропорций деталей в формируемом изображении, к удлинению или укорочению изображения в кадре вдоль строки. Кроме того, описываемый вариант выборки оказывает влияние на эффективность режима временной задержки и накопления (ВЗН) [2] и, как следствие, температурную чувствительность. При анализе будем считать, что величина неравномерности скорости в обоих вариантах одинакова и, соответственно, эффективность ВЗН одинакова.

Неравномерность скорости поворота СЗ обусловлена переходным процессом, статической ошибкой в цепях системы управления сканером — составляющими механических крутильных гармонических колебаний СЗ и ДУП (рис. 2).

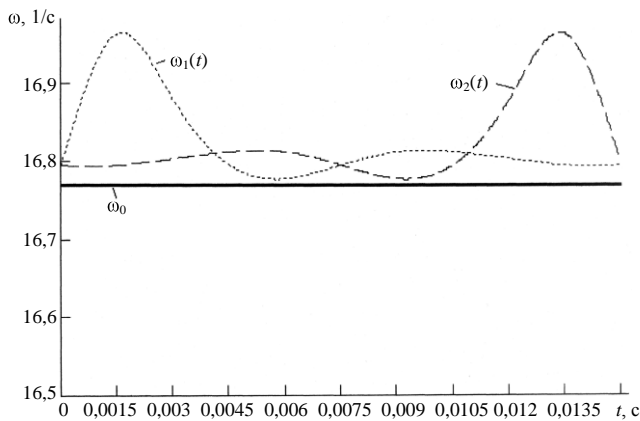


Рис. 2. Графики функции скорости поворота СЗ на линейном участке сканирования

(максимальное значение относительной погрешности угловой скорости СЗ не более 0,6 %):

$\omega_1(t)$ — все сканы при реализации пилообразного движения СЗ и нечетные сканы при реализации "треугольного" закона сканирования; $\omega_2(t)$ — четные сканы "треугольного" закона сканирования; $\omega_0(t)$ — номинальное значение скорости СЗ

Из рис. 2 понятно, что кадры (полукадры) при реализации пилообразного движения функции фактической скорости поворота СЗ имеют одинаковые искажения вдоль направления сканирования. При "треугольном" законе сканирования кадры (полукадры), полученные на нечетных сканах (прямой ход СЗ), отличаются от кадров (полукадров), полученных на четных сканах (на обратном ходе СЗ). Это различие проявляется в смещении деталей изображения относительно друг друга в кадрах, полученных в разных сканах. Накладываясь друг на друга, такие кадры (полукадры) создают иллюзию двоения (или "зубчатости") изображения, что в конечном итоге приводит к снижению разрешающей способности ТВП.

Величина смещения деталей изображения зависит от величины и характера отклонения скорости СЗ от номинальной величины.

Текущее угловое положение СЗ находится интегрированием функции угловой скорости СЗ:

$$\alpha_1(t) = \int_0^t \omega_1(t) dt \text{ — функция углового положения}$$

СЗ при прямом ходе;

$$\alpha_2(t) = \int_0^t \omega_2(t) dt \text{ — функция углового положения}$$

СЗ при обратном скане "треугольного" закона сканирования.

Расхождение в координатах деталей в кадрах (полукадрах), полученных на противоходах СЗ, определяется как:

$$\Delta\alpha_{12}(t) = \alpha_1(t) - \alpha_2(t)$$

или, если выражать в пикселях,

$$\Delta i(t) = N \frac{\Delta\alpha_{12}(t)}{\alpha_0},$$

где α_0 — номинальная амплитуда колебания СЗ;

N — формат кадра в направлении сканирования (в пикселях).

Для примера сканов, показанных на рис. 2, величина расхождений деталей изображения в кадрах (полукадрах), полученных на противоходе, достигает нескольких пикселей (рис. 3).

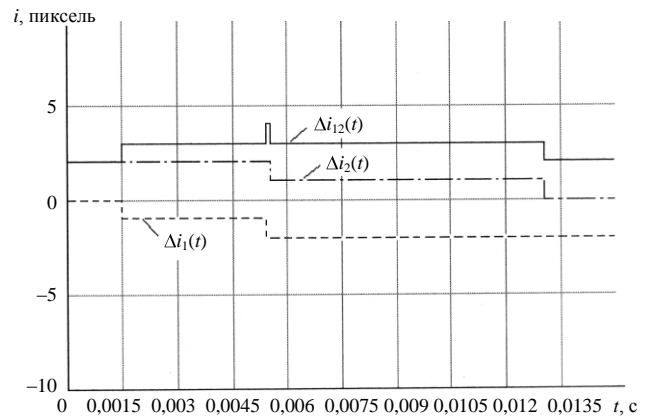


Рис. 3. Отклонение пропорций изображения в кадрах от номинала, выраженное в пикселях, в зависимости от момента времени формирования кадра:

$\Delta i_1(t)$ — величина смещения деталей изображения в пикселях при сканировании в прямом направлении; $\Delta i_2(t)$ — то же, при сканировании в обратном направлении; $\Delta i_{12}(t)$ — величина смещения деталей изображения в кадрах (полукадрах), полученных при противоположных направлениях сканирования

Из рис. 3 видно, что в различных частях кадра (полукадра) детали изображения имеют различную величину смещения.

При сканировании "пилой" изображение деталей в кадрах (полукадрах) также получается непропорциональным. Однако смещение деталей в разных кадрах (полукадрах) имеет одинаковое направление. И накладываясь, такие кадры не приводят к двоению или "зубчатости" изображения.

Чтобы свести к минимуму влияние непропорциональности изображения в кадрах, полученных на противоходе обусловленных неравномерностью скорости, необходима реализация второго варианта выборки. В этом варианте обеспечивается привязка моментов выборки сигналов из СФПУ с пространственным положением СЗ. Практически это можно реализовать с помощью датчика углового положения СЗ, представляющего собой энкодер.

Вариант выборки сигналов СФПУ с привязкой к угловому положению СЗ

Понятно, что в этом варианте выборки сигнала пропорции изображения вдоль направления сканирования не зависят от скорости СЗ и определяются только нелинейностью преобразования угла в ДУП. Нелинейность ДУП не зависит от направления сканирования, поэтому кадры, полученные при этом варианте выборки, имеют одинаковые искажения. Следовательно, изображения, полученные в двух вариантах сканирования, не будут иметь двоений и "зубчатости".

Однако даже наличие синхронизации СФПУ сигналами с ДУП не устраняет все негативные явления, влияющие на тепловое изображение. ДУП, кроме ошибки нелинейности, имеет другие составляющие: ошибки, обусловленные гистерезисом преобразования угла, и случайные ошибки.

Случайные ошибки ДУП и отклонения угла СЗ от номинального удобно привести к характеристике повторяемости закона сканирования.

Особо следует выделить ошибки ДУП, обусловленные наличием люфта в подшипниках сканера. Схема формирования такого рода ошибки показана на рис. 4.

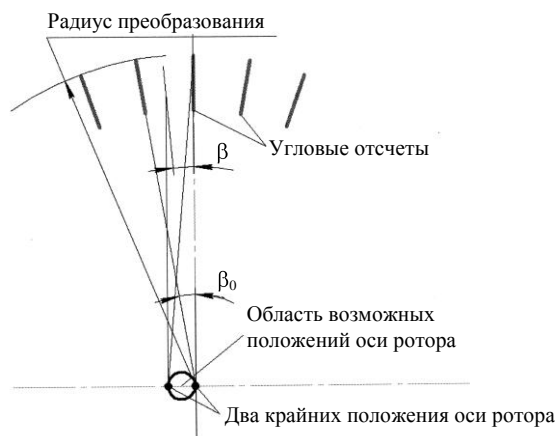


Рис. 4. Схема поперечного сечения сканера по ДУП

Независимо от способа преобразования угла величина ошибки ДУП, обусловленная люфтом ротора датчика в подшипниках, определяется по формуле

$$\beta = \arcsin\left(\frac{r}{R}\right),$$

где R — радиус преобразования;

r — максимальная величина люфта,

или, если привести ошибку ДУП в величину смещения деталей изображения в пикселях:

$$\Delta i = N \frac{\beta}{\theta_0},$$

где θ_0 — величина поля зрения по азимуту.

Например, люфт в 5 мкм при поле зрения 30° и формате кадра вдоль направления сканирования 692 может давать ошибку формирования СИ в ДУП в 55 % (относительно дискреты ДУП) или в абсолютных величинах — порядка 0,42 мрад.

Люфт является элементом, вносящим гистерезис в канал преобразования угла. Необходимо учитывать, что положение ротора сканера в подшипниках определяется усилиями, действующими на него, и его инерционностью. Поскольку в нормальных условиях на ротор сканера действует только усилие от сигнала в обмотке управления сканера, имеющее периодический характер, то и функция изменения положения ротора в подшипниках во времени будет периодической, повторяющейся от скана к скану, т. е. и ошибка в формировании СИ с ДУП также повторяется от скана к скану. Кроме того, из-за инерционности ротора ошибка в синхроимпульсах с ДУП следующих с частотами в десятки килогерц изменяется медленно. Учитывая это, случайная ошибка формирования СИ существенно уменьшается и преобразуется в ошибку нелинейности преобразования угла.

Величина нелинейности при этом не превосходит максимально возможной ошибки ДУП, обусловленной наличием люфта в подшипниках.

Таким образом, наличие люфта проявляется в виде непропорциональности деталей изображения в кадре вдоль направления сканирования. Непропорциональность при этом не превышает одного пикселя (55 % от размера пикселя) в варианте сканирования "пилой".

Однако кадры, полученные при разных направлениях сканирования, имеют в одних и тех же координатах разные направления смещения деталей изображения вдоль строки. И при накладывании таких кадров детали изображения не будут совпадать, т. е. изображение будет двоиться или иметь "зубчатость". Величина несовпадения деталей определяется величиной люфта и для рассматриваемого примера ТВП не превышает 1,1 пикселя, тем

не менее это существенно ухудшает МПФ ТВП в области высоких пространственных частот.

Энергопотребление

Энергопотребление сканирующих устройств составляет около 20—25 % от энергопотребления ТВП и определяется в основном требуемой динамикой движения СЗ. Для электромеханического преобразователя, каковым является сканер с блоком управления (БУ), представляющего собой инерционное звено, мощность, подводимая к сканеру, пропорциональна частоте колебания в 4-й степени (рис. 5).

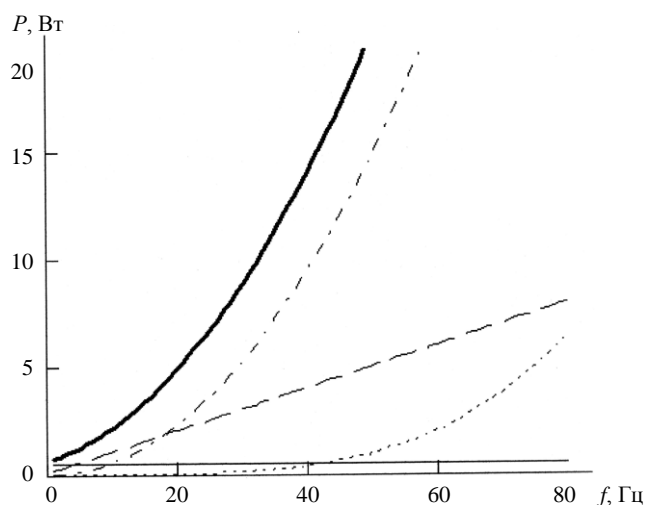


Рис. 5. Зависимость потребляемой мощности от частоты колебания для одной из реализаций сканера: $P(f)$ (· · · ·) — мощность, потребляемая сканером в зависимости от частоты колебания; P_e (—) — мощность, потребляемая электроникой БУ; $P_{id}(f)$ (---) — мощность, рассеиваемая усилителем мощности БУ от сквозных токов; P_a (- · - ·) — мощность, рассеиваемая усилителем мощности при регулировании; $P_s(f)$ (— — —) — суммарная мощность, потребляемая системой сканирования

Понятно, что мощность, необходимая для реализации сканирования по "треугольнику", в 16 раз меньше, чем при сканировании "пилой". Однако следует учесть, что потребление энергии системой сканирования определяется большей частью электроникой БУ сканера, который потребляет в свою очередь в несколько раз больше, чем сам сканер. Причем зависимость потребления энергии БУ сканером имеет не пропорциональную зависимость от мощности, потребляемой сканером. В конечном итоге оказывается, что потребление энергии сканирующей системой, реализующей "треугольный" закон движения СЗ, ниже в 2—4 раза, чем при колебании СЗ по "пиле".

Стоимость

Два варианта сканирования можно реализовать одним и тем же сканером, поэтому принципиаль-

ной разницы в стоимости изготовления сканеров нет. Однако для достижения одинакового качества изображения в варианте сканирования "треугольником" необходимо использование более сложных приемов, чем при сканировании "пилой". Это приводит к увеличению сроков разработки и значительному усложнению блоков управления сканером и СФПУ. По предварительным оценкам, стоимость блоков увеличивается на 20—30 %.

Выводы

1. Без синхронизации выборки СФПУ синхросигналами с ДУП неравномерность скорости поворота СЗ в варианте сканирования "треугольником" приводит к смещению строк в изображении при наличии межстрочной развертки, что проявляется в "зубчатости" изображения и снижает параметры эффективности ТВП. При тех же условиях неравномерность сканирования "пилой" не приводит к "зубчатости" телевизионного изображения.

2. Без синхронизации выборки СФПУ синхросигналами с ДУП при использовании полноформатного кадра изображение, получаемое сканированием "треугольником", из-за неравномерности скорости поворота СЗ будет двоющимся. При тех же условиях сканирование "пилой" не приводит к двоению изображения.

3. Привязка выборки СФПУ с угловым положением СЗ значительно уменьшает смещение строк и двоений в изображении, получаемом сканированием "треугольником". Величина смещения определяется величиной люфта и не превышает 1—2 пикселя. Те же условия в варианте сканирования "пилой" обеспечивают пропорциональность изображения во всем поле зрения.

4. При условии обеспечения одинаковых характеристик телевизионного изображения стоимость изготовления сканирующего устройства, реализующего "треугольный" закон сканирования, оказывается выше на 20—30 %, чем стоимость сканирующего устройства, реализующего пилообразное движение СЗ.

5. Мощность, потребляемая сканирующим устройством при реализации "пилообразного" закона поворота СЗ, в 2—4 раза больше, чем при реализации "треугольного" закона сканирования.

Литература

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978. — 407 с.
2. Трищенко М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992. — 400 с.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Comparison variants of scanning in thermal imager 2-nd generations

R. M. Aleev, R. A. Nasibullin
JOINT-STOCK COMPANY «SPC "OPTOOIL"», Kazan, Russia

Two variants of scanning in thermal imager (TI) 2-nd generations are compared: the "sawtooth" law of change angular position of scanning mirror (SM) in time and "triangular". Features of technical realization of reception thermal images in two variants of scanning have been considered. The parameters of scanning movement most essentially influence on thermal image are revealed. The mathematical analysis of influence of variants of scanning on thermal image is lead.

УДК 681.7.02

Исследование технологических факторов, влияющих на качество тонких пленок диоксида кремния в целях повышения эксплуатационных характеристик оптических сборок, изготовленных методом глубокого оптического контакта

А. К. Герасюк, А. И. Гоев, Е. Е. Гринберг, В. В. Потелов, Б. Н. Сенник, А. Б. Сухачев
ФНЦП ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", г. Красногорск, Московская обл., Россия

А. В. Ноздрачев
Счетная палата РФ, Москва, Россия

Рассмотрены преимущества призмных спектроделительных модулей, применяемых в специальных изделиях с высокой пространственной ориентацией, и некоторые особенности технологии их изготовления.

Проблема создания оптико-электронных систем для изделий с высокой пространственной ориентацией, в частности, для дистанционного зондирования Земли из космоса, передачи азимута систем прицеливания оперативно-тактических ракетных комплексов и пр., во многом зависит от успешного решения конструкторских и технологических задач, связанных с изготовлением и применением высокоточных оптических узлов в призмных спектроделительных модулях.

Важнейшими требованиями к модулям являются требования сохранности его конструктивных и оптотехнических параметров от механических, тепловых, климатических воздействий, соответствующих этапам хранения, транспортировки, выведения на заданную орбиту, а также сохранности параметров спектроделительного модуля в процессе эксплуатации.

Типовые конструкторско-технологические требования к высокоточному спектроделительному модулю приведены в табл. 1.

Таблица 1

Требования	Параметр	Номинал параметра	Погрешность	
			изготовления	контроля
Погрешность изготовления оптических поверхностей призм	$N, \Delta N$	0	0,2	0,1
Пирамидальность призм, мин	π	0	10	1
Погрешность взаимного углового положения призм, мин	β	0	5	1
Клиновидность призмного блока, мин	γ	0	30	1
Погрешность взаимного линейного положения призм, мм	S	0	0,05	0,003
Погрешность воздушного промежутка, мм	d	0,02	0,01	0,001
Интегральное отношение фон/сигнал по уровню 0,5 в области спектра от 0,4 до 1,1 мкм в каждом канале, %	Φ/C	0	8	2
Коэффициент пропускания фона, %	τ	0	< 0,2	0,1