

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГРАММИРУЕМОГО ДВУХКООРДИНАТНОГО ПРИВОДА СКАНИРУЮЩЕГО ЗЕРКАЛА

С.В. Медушев, В.Е. Ремизов, В.В. Шичков  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*Рассмотрены перспективные варианты построения программируемого двухкоординатного привода сканирующего зеркала (ПСЗ) для телевизионных спектрорадиометров КА нового класса: электронно-механических сканеров высокого разрешения с адаптируемыми параметрами. Обсуждаются три варианта компоновки ПСЗ с различными оптико-кинематическими схемами: с минимизацией массогабаритных характеристик и геометрических искажений растровой развертки изображения при обеспечении высокой угловой чувствительности (<math><0,05</math> угл.с) контроля положения сканирующего зеркала (визирного луча) с использованием интерферометрических измерителей в угловом диапазоне не менее  $\pm 15$  угл. град при габаритах сканирующего зеркала до 430×800 мм и частоте сканирования до 1 Гц.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, бортовая аппаратура, привод сканирующего зеркала, развертка изображения, растр, интерферометрический измеритель перемещений.

Современное состояние и тенденции развития аппаратуры оперативного наблюдения и дистанционного зондирования Земли [1–3] определяют дальнейшую перспективу построения и применения программируемых прецизионных приводов сканирующих зеркал (ПСЗ), обеспечивающих развертку изображений подстилающей поверхности в телевизионных спектрорадиометрах (ТСР) на КА ДЗЗ. Основные характеристики таких ПСЗ должны соответствовать перспективам развития целевых характеристик наблюдательной аппаратуры, базирующейся на одном КА: дальнейшее увеличение пространственного разрешения (линейного  $<1$  м, углового  $<0,3$  угл. с) при съемках суши (с орбит высотой 400 ... 700 км) с узкой полосой обзора (до 50 км) с возможностью дискретного изменения разрешения при съемках океана с широкой полосой обзора (до 500 ... 800 км); при этом аппаратура должна обеспечивать многоканальную спектрально-зональную съёмку в широком спектральном диапазоне (от 0,4 до 12 мкм).

ТСР с электронной разверткой изображения не могут решить такую задачу, поскольку в этом случае требования к необходимым зеркальным объективам ТСР (полю зрения и качеству изображения) и к фотоприемным устройствам (габаритам линейных или матричных ПЗС) практически не выполнимы [4]. Это подтверждают и характеристики аппаратуры для ДЗЗ с электронной разверткой изображения современных КА, недавно введенных в эксплуатацию различными странами [1].

Одним из путей решения поставленной целевой задачи является применение комбинированной системы развертки изображения, включающей программируемый двухкоординатный электромеханический привод для перемещения визирного луча в пространстве предметов с помощью сканирующего зеркала (СЗ) и синхронизированную с его движением электронную раз-

вертку в плоскости изображений с использованием матричного фотоприемника (МФП), работающего в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) зарядов [4].

Соответственно, параметры ПСЗ должны обеспечивать адаптируемые режимы съемки с перестройкой пространственного разрешения снимков и размеров полос сканирования (съемки) и обзора, а также прецизионное позиционирование и угловое смещение полос съемки. При этом необходимо обеспечить минимальные массогабаритные характеристики ПСЗ, позволяющие применять их на малых КА.

Помимо целевого применения указанных ПСЗ в аппаратуре ДЗЗ возможно их использование для высокоточного перенацеливания и позиционирования визирной линии (ВЛ) в пространстве, например в системах оптической космической связи с базированием на геостационарном КА.

Рассмотрим возможные варианты компоновки ПСЗ с минимизацией массогабаритных характеристик и геометрических искажений растровой развертки изображения при обеспечении высокой угловой чувствительности (разрешения) положения СЗ ВЛ.

Минимальные габариты СЗ определяются минимальным размером входного зрачка оптической системы (объектива) ТСР, обеспечивающего целевые характеристики ТСР, главными из которых являются пространственное разрешение, радиометрическая чувствительность (отношение сигнал / шум), полоса сканирования (обзора).

Поскольку физическим фактором, ограничивающим пространственное разрешение ТСР, является дифракция света на входном зрачке, то для обеспечения углового разрешения точек изображения (с видимым контрастом в 5%), равным 0,3 угл. с (для света с длиной волны 555 нм) требуется размер входного зрачка [5]:  $D_{\text{вх.зр}} = 120 \text{ [угл. с]} / 0,3 \text{ [угл. с]} = 400 \text{ мм}$ .

Такая традиционная оценка имеет первичный характер: реально необходимый размер входного зрачка, помимо обеспечения пространственного разрешения, должен удовлетворять заданному значению сигнал/шум и зависеть от нескольких десятков влияющих параметров, определяющих условия и геометрию наблюдения, характеристики атмосферы, характеристики оптической системы, характеристики фотоприемного устройства и т. д. Прогресс в технологии производства МФП и их применение в режиме ВЗН позволяет вплотную приблизиться к дифракционному пределу разрешения при съемках в оптимальных условиях и использовании узкопольных оптических систем ТСР.

Таким образом, можно сделать первичную оценку минимального размера СЗ по оси строчного движения для указанного пространственного разрешения:  $C_{сз} \sim D_{вх.зр} \sim 400$  мм. Второй габаритный размер СЗ зависит от максимальных углов  $\pm\alpha$  поворота СЗ в процессе строчного движения и углом  $i_0$  между нормалью СЗ в среднем положении и оптической осью объектива ТСР:  $K_{сз} \sim D_{вх.зр} / \cos(i_0 + \alpha)$ . При обычном  $i_0 = 45^\circ$  и проектном  $\alpha = 15^\circ$ ;  $K_{сз} \sim 2D_{вх.зр} \sim 800$  мм.

Очевидно, что при таких значительных габаритах СЗ должно крепиться к корпусу ПСЗ с помощью карданова подвеса, расположенного внутри (в центральной части) СЗ. В свою очередь, такое решение определяет и способы построения оптико-кинематической схемы привода.

Поскольку ось строчного движения однозначно расположена перпендикулярно к оптической оси объектива ТСР, все вариации схемы связаны с вариантами пространственного положения оси поворота СЗ для кадровой развертки.

Наиболее компактная компоновка ПСЗ обеспечивается при расположении кадровой оси параллельно отражающей плоскости СЗ в его среднем положении, как это сделано в блоке строчно-

кадровой развертки (БСКР) в КА "Электрон" и "Сич" [6]. Однако такая монтаж СЗ приводит к искажениям растрового изображения и, соответственно, к геометрическим и фотометрическим погрешностям [6]. Для их исправления требуется введение корректирующих поправок в программу (законы) движения СЗ [6]. Вероятно, такое усложнение программы движения СЗ не должно вызвать больших затруднений при его реализации, поэтому указанная схема монтажа СЗ и компоновки ПСЗ в целом по-прежнему остается рациональной и перспективной при использовании крупногабаритных зеркал. Причем, следует отметить принципиальное преимущество ПСЗ БСКР перед известными аналогами: примененный в нем

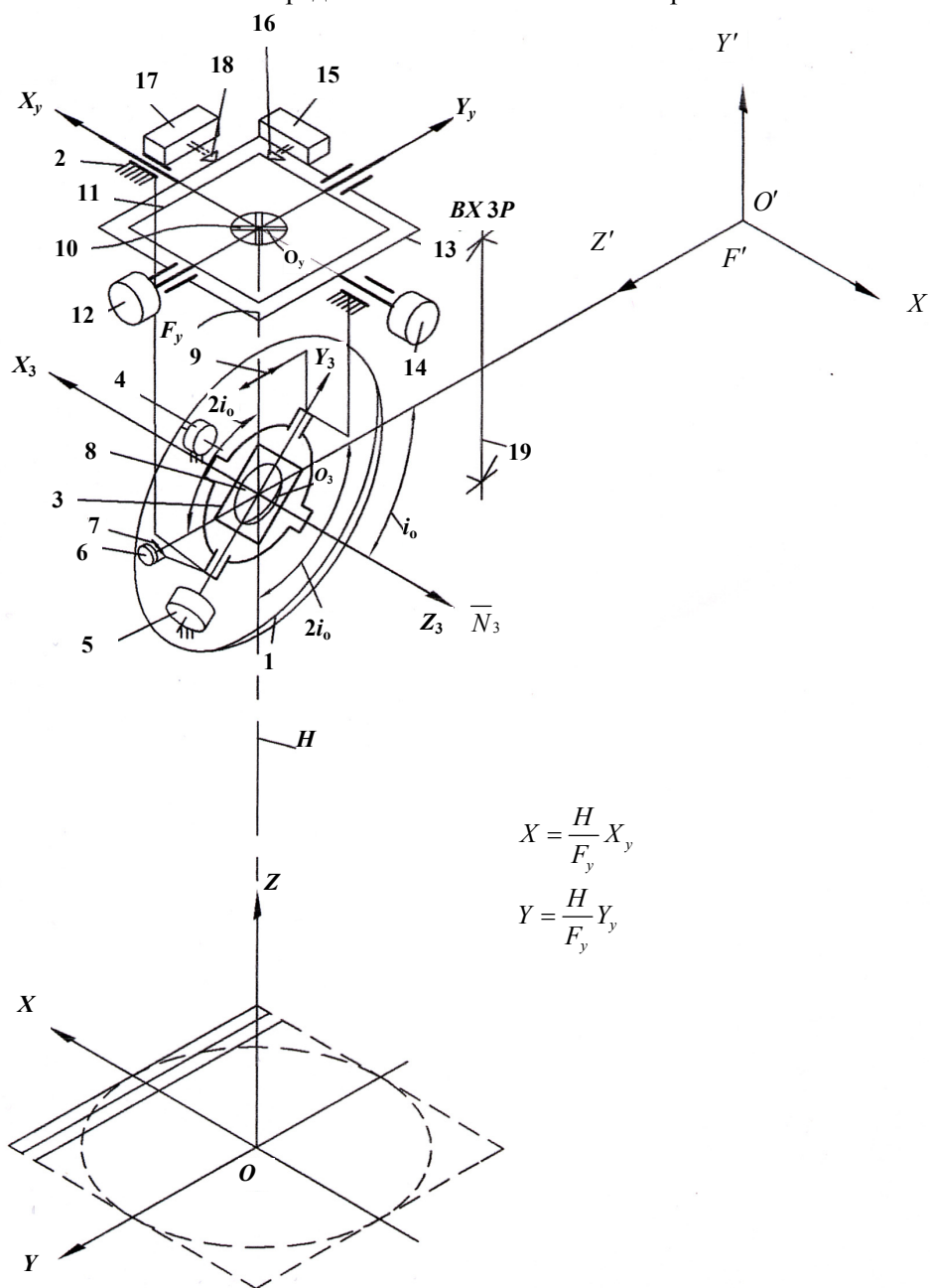


Рис. 1. Оптико-кинематическая схема ПСЗ-VII

$$X = \frac{H}{F_y} X_y$$

$$Y = \frac{H}{F_y} Y_y$$

двухкоординатный интерферометрический измеритель углового положения СЗ позволяет обеспечить требуемую в перспективе угловую чувствительность (разрешение  $< 0,05$  угл. с) положения СЗ.

Другой принципиальной возможностью исправления искажений растрового изображения при использовании как вышеуказанной кинематической схемы, так и любой другой, является применение для управления движением СЗ системы контроля положением ВЛ, т. е. управления движением СЗ по заданной программе перемещения ВЛ в плоскости наблюдения [7].

Оптико-кинематическая схема ПСЗ-ВЛ показана на рис.1, где обозначены:  $XOYZ$  – неподвижная система координат (с. к.) в плоскости наблюдения (вариант геостационарного КА), в которой по оси  $Y$  происходит строчная развертка и по оси  $X$  – кадровая развертка, а ось  $Z$  совпадает с местной вертикалью;  $X'O'Y'Z'$  – с. к. в плоскости изображения (в фокальной плоскости объектива 18 ТСП);  $X_3O_3Y_3Z_3$  – с. к., связанная с СЗ, где ось  $X_3$  совпадает с подвижной осью строчного движения, ось  $Y_3$  – с неподвижной осью кадрового движения и ось  $Z_3$  – с нормалью  $N_3$  к отражающей плоскости СЗ;  $X_yO_yY_y$  – подвижная с. к., связанная с перемещающимся позиционно-чувствительным элементом (ПЧЭ) 10, в которой ось  $OX_y$  параллельна оси  $OX$  кадрового перемещения ВЛ и ось  $Oy$  параллельна оси  $OY$  строчного перемещения ВЛ.

Устройство содержит СЗ 1, которое крепится к корпусу-основанию 2 с помощью карданова подвеса 3, двигатель-маховик 4, жестко закрепленный на СЗ в положении, при котором ось вращения маховика параллельна оси  $X_3$  и подвижной строчной оси карданова подвеса, двигатель-маховик 5, жестко закрепленный на СЗ в положении, при котором ось вращения его маховика параллельна оси  $Y_3$  и неподвижной кадровой оси карданова подвеса. Система управления и контроля положением ВЛ содержит источник света 6 с коллиматором 7, плоское зеркало 8, расположенное в центральной части СЗ и жестко связанное с ним, причем, отражающая плоскость зеркала 8 параллельна отражающей плоскости СЗ, объектив 9, в фокальной плоскости которого расположен квадрантный ПЧЭ 10, закрепленный на подвижной каретке 11, имеющей возможность перемещаться по двум взаимноперпендикулярным осям  $X_y, Y_y$  с помощью приводов 12 и 14. При этом соответствующие перемещения измеряются с помощью интерферометрических измерителей линейных перемещений (ИЛП) 15 и 17, один из которых (15) закреплен на подвижной каретке 13, а второй на корпусе 2. Соответственно, подвижные опорные отражатели ИЛП

закреплены на каретках: 16 – на каретке 11 и 18 – на каретке 13. При этом оптическая ось коллимированного пучка света, падающего на зеркало 8 параллельна оптической оси (оси  $Z'$ ) объектива 18 ТСП и плоскость  $X_yO_yY_y$  параллельна плоскости  $XOY$ .

Система управления ВЛ и ПСЗ-ВЛ в целом работает следующим образом. Источник света 6 вместе с коллиматором 7 формируют контрольный пучок света, который после отражения от зеркала 8 фокусируется объективом 9 на чувствительной площадке ПЧЭ 10. При отклонении энергетического центра контрольного пучка от центра ПЧЭ возникают сигналы рассогласования в исполнительной системе, которая совместно с двигателями 4 и 5 воздействуют на СЗ 1 (и зеркало 8) так, чтобы свести к нулю сигналы рассогласования и устранить указанное отклонение. При перемещении ПЧЭ с помощью электроприводов 12 и 14 по линейной строчно-кадровой траектории контрольный пучок света, отраженный от зеркала 8, и ВЛ перемещаются вместе с ПЧЭ по той же траектории. Изображение, получаемое в этом случае объективом 19, не содержит искажений, обусловленных разверткой СЗ, и не требует дополнительной коррекции.

Программа движения ПЧЭ при строчно-кадровой развертке изображения в плоскости предметов будет описываться следующими линейными зависимостями:

$$Y_y = v[t - T/4(2N - 1)](-1)^{(N-1)}; \quad (1)$$

$$X_y = \Delta X_y(N_t - N_0), \quad (2)$$

где  $Y_y, X_y$  – программные значения перемещений ПЧЭ по соответствующим осям,  $v$  – программное значение скорости перемещения ПЧЭ по строчной оси;  $t$  – текущее время, с;  $T$  – период строчного движения, с;  $N$  – номер полупериода строчного движения ПЧЭ;  $\Delta X_y$  – величина шагового перемещения ПЧЭ по кадровой оси;  $N_t$  – число текущих шаговых перемещений;  $N_0$  – полное число шаговых перемещений.

Координаты точек наблюдения в плоскости предметов  $XOY$  будут соответствовать координатам положения центра ПЧЭ в плоскости  $X_yO_yY_y$  с линейным масштабным коэффициентом  $K_m = H/F_y$ , где  $H$  – высота орбиты КА;  $F_y$  – фокусное расстояние объектива 9, т. е.  $X = K_m X_y$  и  $Y = K_m Y_y$ .

Например, при  $H = 600$  км и  $F_y = 60$  мм:  $K_m = 10^7$  и размеру линейного разрешения на местности ЛРМ = 1 м будет соответствовать перемещение ПЧЭ = 100 нм или угловое перемещение СЗ (вблизи среднего положения)  $\sim 0,2$  угл.с. Осуществить контроль пере-

мещений ПЧЭ с такой чувствительностью с применением интерферометрических ИЛП с разрешением порядка 10 нм не вызовет затруднений.

Следует отметить, что для существенного уменьшения массы и габаритов интерферометрических ИЛП и ИУП, повышения их надежности и ресурса работы необходимо применение в них одночастотных (одномодовых) полупроводниковых или твердотельных лазеров вместо газовых (He-Ne), использованных в БСКР на КА "Электро".

Решающее значение для реализации рассматриваемого варианта построения ПСЗ-ВЛ будет иметь позиционная чувствительность ПЧЭ.

Оценка позиционной чувствительности ПЧЭ, например, квадрантного фотодиода ФД 19КК [8], при использовании в качестве источника света 6 лазера типа ИЛПН мощностью 10 мВт и формировании пятна света на ПЧЭ размером ~ 100 мкм дает значение  $S \sim 10$  мкА/мкм, что позволяет положительно прогнозировать возможность применения указанного ПЧЭ (или его аналога) для обеспечения требуемой чувствительности системы управления положением СЗ.

Диапазон линейных перемещений  $(X_y, Y_y)$  ПЧЭ определяется шириной полосы сканирования  $L_c$  или обзора  $L_o$  и масштабным коэффициентом  $K_M$ :  $X_c = L_c/K_M$  и  $Y_c = L_o/K_M$ . Например, при  $K_M=10^7$  и  $L_c = 30$  км:  $X_c = 3$  мм. Соответственно, при  $L_o = 500$  км  $X_o = Y_o = 50$  мм.

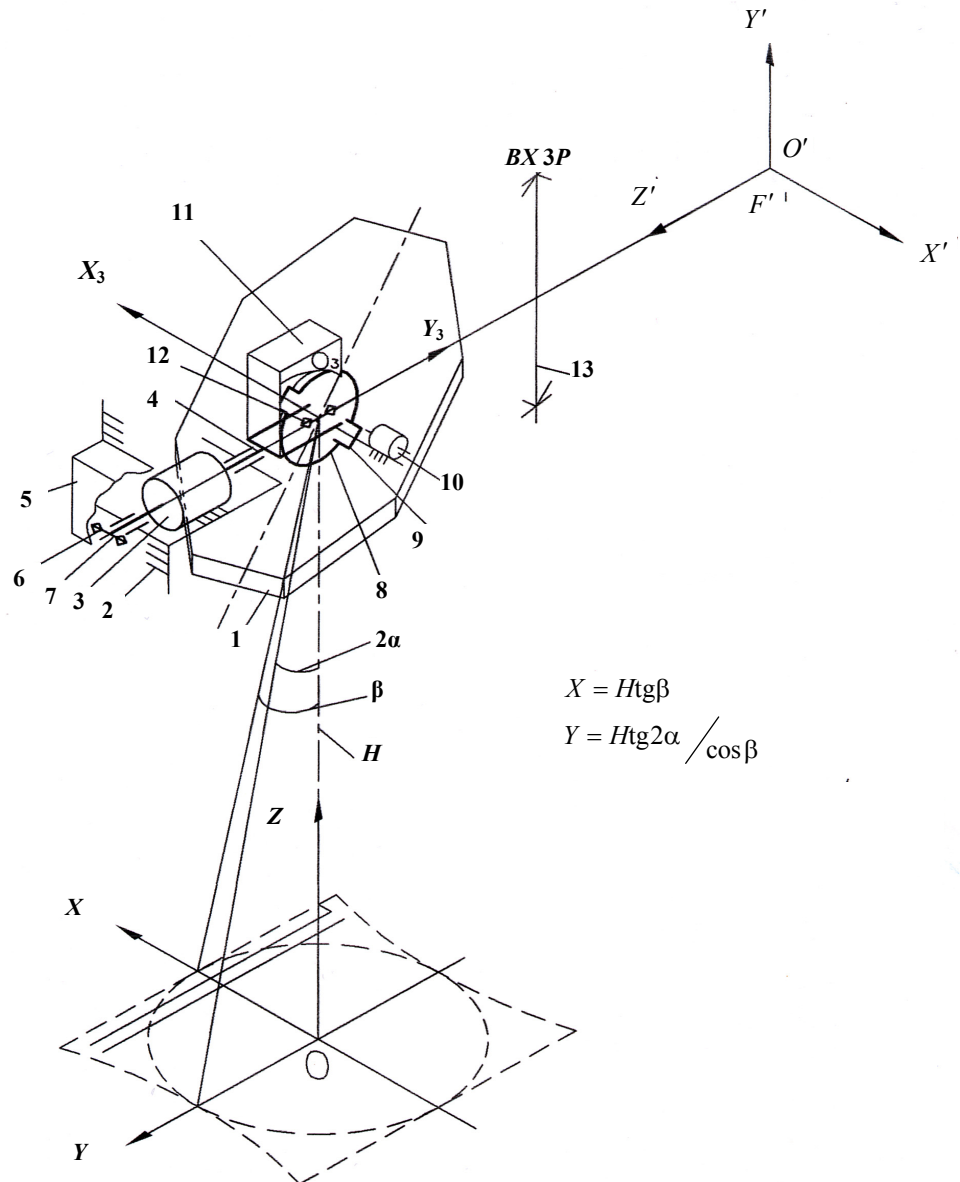
Частота строчного сканирования зависит от параметров орбиты КА, пространственного разрешения, числа накапливающих столбцов МФП и может лежать в диапазоне от десятых до единиц герц.

На основании сделанных численных оценок требований к ПСЗ-ВЛ в качестве исполнительных движителей ПЧЭ могут быть использованы линейные двигатели, а для перемещения (качания) СЗ целесообразно использовать двигатели-маховики, позволяющие практически полностью исключить возмущающие воздействия от их работы на при-

борную платформу.

Достоинства данного варианта построения ПСЗ-ВЛ достаточно очевидны:

- устранение искажений растровой развертки изображения, что необходимо для применения МФП большого формата, работающего в режиме ВЗН;
- методическое увеличение в два раза угловой чувствительности;
- простая линейная зависимость между положением (скоростью движения) точек (пикселей) изображения и положением зарядов в МФП упрощает схему управления переносом зарядов в режиме ВЗН и уменьшает влияние "смаза" на качество изображения;
- устранение влияния кинематических погрешностей в подвижных узлах перемещения СЗ на погрешность положения ВЛ.



$$X = H \operatorname{tg} \beta$$

$$Y = H \operatorname{tg} 2\alpha / \cos \beta$$

Рис. 2. Оптико-механическая схема ПСЗ-II

Недостатки варианта ПСЗ-ВЛ также очевидны:  
– применение узлов крепления и перемещения ПЧЭ вместе с дополнительными приводами существенно усложняет конструкцию и систему управления ПСЗ;

– аналоговая зависимость позиционной чувствительности ПЧЭ и возможная разница дрейфа чувствительности отдельных фотоприемных площадок ПЧЭ могут создать дополнительные погрешности положения энергетического центра светового пятна контрольного ВЛ;

– несимметричные (полевые) аберрации объектива 9 могут привести к искажению формы и смещению энергетического центра светового пятна контрольного ВЛ в процессе сканирования.

Практические перспективы применения варианта построения ПСЗ-ВЛ можно оценить только после экспериментальных исследований и конструкторских проработок.

Более простым и, на наш взгляд, достаточно перспективным является третий вариант построения ПСЗ-П, в котором используется панорамическая монтировка СЗ, обеспечивающая допустимые искажения растрового изображения при относительно простой конструкции ПСЗ-П.

Оптико-кинематическая схема варианта ПСЗ-П показана на рис. 2, где обозначены: с. к.  $XOYZ$  и  $X'O'Y'Z'$  – аналогичны с. к. рис. 1, с. к.  $X_3O_3Y_3$  связана с СЗ, причем, подвижная ось  $X_3$  совпадает с осью строчной развертки и ось  $Y_3$  – с осью кадровой развертки и с оптической осью  $Z'$  объектива 13 ТСП (или параллельна ей). Устройство содержит: 1 – СЗ; 2 – корпус-основание ПСЗ; 3 – двигатель-маховик для кадровой перемещения СЗ, корпус которого закреплен на основании 2, и на ось-вилку 4 которого подвешено СЗ1; СЗ имеет центральное отверстие, в котором закреплена оправа 8 с двумя подшипниковыми узлами 9, в которые входят цапфы, жестко связанные с кадровой осью 4, и образуют ось строчного движения СЗ, которое обеспечивает двигатель-маховик 10, корпус которого закреплен на СЗ в положении, при котором ось его маховика параллельна оси строчного движения. Для контроля строчных перемещений используется интерферометрический измеритель угловых перемещений (ИУП) 11, закрепленный на кадровой оси 4, вместе с опорными отражателями 12, закрепленными на оправе 8 так, чтобы измерительная база ИУП совпадала с направлением кадровой оси в среднем положении СЗ. Кадровые перемещения СЗ контролируются с помощью аналогичного ИУП 5, закрепленного на основании 2, совместно с опорными отражателями 6, закрепленными на рычаге 7, жестко связан-

ым с кадровой осью 4 и обеспечивающим измерительную базу ИУП 5 в перпендикулярном направлении к кадровой оси 4.

Такая оптико-кинематическая схема ПСЗ позволяет получить растровую развертку изображения с параллельными строками (сканами), что является необходимым условием для применения в ТСП МФП с ВЗН зарядов.

Координаты точек визирования в плоскости наблюдения для варианта ПСЗ-П будут определяться зависимостями:  $X = H \operatorname{tg} \beta$  и  $Y = H \operatorname{tg} 2\alpha / \cos \beta$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  – углы поворота СЗ вокруг осей строчного и кадровой движений относительно его среднего положения.

Программа движения СЗ при строчно-кадровой развертке изображения описывается следующими зависимостями:

$$\sin \alpha = w[t - T/4(2N - 1)](-1)^{(N-1)}; \quad (3)$$

$$\sin \beta = \Delta \beta (N_s - N_o/2), \quad (4)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – программные значения углов поворота СЗ, рад;  $w$  – программное значение угловой скорости поворота СЗ вокруг строчной оси при среднем его положении, рад/с;  $t$  – текущее время, с;  $T$  – период движения СЗ вокруг строчной оси, с;  $N$  – номер полупериода строчного движения СЗ;  $\Delta \beta$  – величина шагового приращения кадровой оси, рад;  $N_s$  – число шаговых перемещений СЗ вокруг кадровой оси, предшествовавших данному интервалу рабочего времени;  $N_o$  – полное число шаговых перемещений при выполнении рабочей программы.

Одним из очевидных недостатков варианта кинематической схемы ПСЗ-П является влияние кинематических погрешностей подшипниковых узлов крепления строчной и кадровой осей СЗ на погрешность положения СЗ, поскольку контроль положения СЗ при повороте вокруг кадровой оси осуществляется по угловому положению кадровой оси, а не по положению самого СЗ.

Для обеспечения минимальных массогабаритных характеристик ПСЗ-П при использовании панорамической компоновки с консольным подвесом СЗ на кадровой оси ее целесообразно применять для ТСП с размером входного зрачка не более 250 мм и дифракционным разрешением  $\sim 0,5$  угл.с, что, конечно, ограничивает область применения варианта компоновки ПСЗ-П, но она достаточно обширна, чтобы считать его перспективным.

В итоге, для наглядности, основные характеристики рассмотренных вариантов построения ПСЗ, перспективных, на наш взгляд, для практического применения в новых разработках более совершенной наблюдательной аппаратуры ДЗЗ, сведены в таблицу.

Характеристика	Аналог БСКР ([7], рис. 1)	ПСЗ-ВЛ (рис. 1)	ПСЗ-П (рис. 2)
Целевое назначение: строчно-кадровое сканирование пространства предметов	+	+	+
двухкоординатное наведение и позиционирование ВЛ	+	+	+
Опτικο-кинематическая схема	[7]: рис. 1	рис. 1	рис. 2
Программа движения СЗ (ПЧЭ)	[7]: уравнения (1),(2)	уравнения (1),(2)	уравнения (3),(4)
Необходимость коррекции раstra	нужна	не нужна	не нужна
Угловой диапазон перемещений СЗ: сканирование (адаптируемое): $\alpha, \beta$ , угл. град; длина полосы, км позиционирование: $\alpha, \beta$ , угл. град; поле обзора, км $\times$ км	$\alpha = \pm (1...10); \beta = \pm (0,1...14)$  $\alpha = \pm 15; \beta = \pm 21$	30 ... 500  500 $\times$ 500	$\alpha = \pm (1...5); \beta = \pm (0,1...10)$  $\alpha = \pm 15; \beta = \pm 30$
Чувствительность (разрешение) положения СЗ (ВЛ), угл. с (м)	<0,05	<0,1 (м)	<0,05
Частота строчного сканирования, Гц	0,1...1	0,1...1	0,1...2
Световой диаметр вх. зр.ТСП/световые размеры СЗ, мм	>400/430 $\times$ 800	>400/430 $\times$ 800	<250/290 $\times$ 500
Прогнозируемая масса СЗ, кг	10 (бериллий)	10 (бериллий)	8 (ситалл)
Прогнозируемая масса ПСЗ, кг	40	45	25

Указанные в таблице численные значения характеристик являются оценочными и могут изменяться и уточняться в процессе конкретного проектирования и практической реализации.

Выбор варианта построения ПСЗ из рассмотренных трех будет определяться целевой задачей аппаратуры, где он будет использован, и характеристиками КА в целом.

### Литература

1. Болсуновский М.А. Сравнительный анализ оптических данных ДЗЗ / М.А. Болсуновский // Совзонд. – 2008. – Вып. 10.
2. Горбунов А.В. Малые космические аппараты – новые средства дистанционного зондирования Земли из космоса / А.В.

- Горбунов // Труды ВНИИЭМ. – М., 2001. – Т.100. – С. 18 – 41.
3. Макриденко Л.А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение / Л.А. Макриденко, К.А. Боярчук // Труды ВНИИЭМ. – М., 2005. – Т.102. – С. 12 – 27.
4. Серёгин В.И. О возможности создания сканера высокого разрешения / В.И. Серёгин, И.П. Цветкова // Труды ГосНИЦИПР. – М., 1990. – Т.37.
5. Максудов Д.Д. Астрономическая оптика / Д.Д. Максудов. – 1946.
6. Медведев Ю.Е. Исследование метрологических характеристик БСКР / Ю.Е. Медведев, С.В. Медушев, В.Е. Ремизов [и др.] // Труды ВНИИЭМ. – М., 2001. – Т.100. – С. 115 – 124.
7. А. с. 1481702 (СССР). Устройство сканирования // А.В. Морозов, В.Е. Ремизов, С.А. Стома [и др.]. – 1989; Бюл. №19.
8. Аксененко М.Д. Приемники оптического излучения: справочник. / М.Д. Аксененко, М.Л. Бараночников. – М.: Радио и связь, 1987.

*Сергей Валентинович Медушев, начальник отдела, т.365-30-07.*

*Валерий Евгеньевич Ремизов, главный специалист, т.366-30-33.*

*Виктор Васильевич Шичков, канд. техн. наук, начальник лаборатории, т.366-30-33.*

*E-mail: vniiem@vniiem.ru*