

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 520.24; 681.51

### ПОДСИСТЕМА ГИДИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ТЕЛЕСКОПА С ПОЛЕМ ЗРЕНИЯ МЕНЬШЕ УГЛОВОГО РАЗМЕРА СОЛНЕЧНОГО ДИСКА

© В. Н. Котов, А. А. Лубков, Ю. А. Попов

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: lubkov@iae.nsk.su*

Анализируется методика наведения на цель солнечного телескопа высокого пространственного разрешения, имеющего угловое поле зрения меньше углового размера диска Солнца, с использованием вспомогательного телескопа гидирования, поле зрения которого охватывает весь диск Солнца и его окрестности. Рассмотрены требования к разрешению телескопа гидирования, режимы наведения на цель, структурная схема процесса наведения.

*Ключевые слова:* гидирование, солнечный телескоп, поле зрения, указание цели.

DOI: 10.15372/AUT20200310

**Введение.** Подсистема гидирования предназначена для точного наведения телескопа на объект и удержания его изображения в центре поля зрения регистрирующей аппаратуры.

Цель на Солнце или его окрестностях может быть задана в гелиоцентрической, например кэррингтоновской, системе координат либо в инструментальной системе координат телескопа. Значения координат могут определяться позицией выбранного для исследования элемента изображения относительно центра солнечного диска. Однако современные солнечные телескопы наземного базирования не формируют полного изображения Солнца. Они ориентированы на применение адаптивной оптики (АО), которая обеспечивает угловое разрешение  $0,03'' - 0,07''$  [1], но способна корректировать волновой фронт изображения в ограниченном поле зрения  $1' \times 1'$ , максимум  $2' \times 2'$ , в то время как полные угловые размеры Солнца  $\sim 32' \times 32'$ . Телескоп, оборудованный АО, не подходит для указания цели и для гидирования относительно лимба Солнца. Поэтому возникает потребность иметь вспомогательный телескоп полного диска, назовём его телескопом гидирования (ТГ), который должен обеспечить одновременно наблюдение диска Солнца, фотосферы, хромосферы и прилегающих областей внутренней короны. Анализ процесса наведения с использованием ТГ актуален в связи с созданием Крупного солнечного телескопа-коронографа [2] — одного из основных инструментов Национального гелиогеофизического комплекса РАН. Телескопы гидирования предусмотрены в составе других строящихся перспективных солнечных телескопов: EST (the European Solar Telescope) и DKIST (the Daniel K. Inouye Solar Telescope). В EST есть дополнительный телескоп полного диска AFDT (the Auxiliary Full-Disc Telescope) [3], в DKIST — телескоп указания цели TAS (the Target Acquisition Telescope) [4]. Проектируемое круглое поле зрения AFDT составляет  $72' \times 72'$ , а размер матрицы квадратного фотоприёмника, вписанной в указанное поле зрения, будет соответствовать полю зрения  $51' \times 51'$ .

Вспомогательный телескоп гидирования может быть расположен на общей монтировке с основным телескопом (ОТ) или иметь собственную. В первом случае (конструктивно

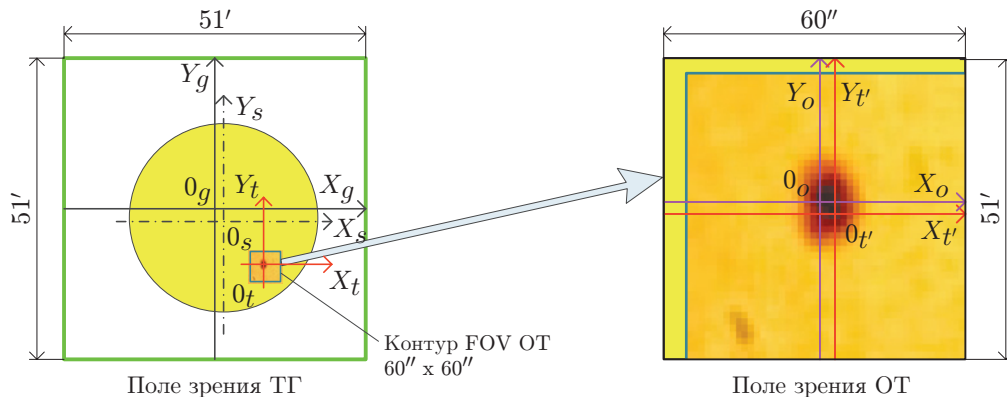


Рис. 1. Указание цели основного телескопа с помощью телескопа гидирования

и юстировкой) обеспечивается совпадение оптических осей телескопов, в результате наведения на цель ТГ обеспечивает её расположение в центре поля зрения (field of view — FOV) ОТ.

Цель данной работы — анализ процесса наведения и режимов указания цели с использованием телескопа гидирования, конструктивно не связанного с основным, определение требований к его параметрам и действий оператора в процессе наведения ОТ на объект наблюдения.

**Назначение телескопа гидирования и его использование для указания цели.** Телескоп гидирования должен обеспечить:

1. Наведение FOV ТГ на центр изображения диска Солнца, вычисление смещения центра Солнца относительно геометрического центра фоторегистратора.
2. Вычисление инструментальных координат указанной оператором цели относительно центра изображения диска Солнца.
3. Наведение основного телескопа на цель с погрешностью, определяемой разрешением ТГ.
4. Визуализацию положения контура поля зрения ОТ и репера цели одновременно с изображением Солнца и его окрестностей.

Слева на рис. 1. показаны: изображение Солнца на мониторе ТГ; контур FOV ОТ, ограничивающий область окрестности наблюдаемой цели ОТ; координатные оси: матрицы ТГ  $(X_g, 0_g, Y_g)$ , Солнца  $(X_s, 0_s, Y_s)$ , цели ОТ  $(X_t, 0_t, Y_t)$ . Справа — изображение цели на мониторе ОТ, координатные оси матрицы фоторегистратора ОТ  $(X_o, 0_o, Y_o)$  и проекции на неё осей цели  $(X_t', 0_t', Y_t')$ .

Оператор может указать цель курсором, перемещая на мониторе ТГ координатные оси цели  $(X_t, 0_t, Y_t)$  в любую позицию поля зрения ТГ.

Предположим, что для ТГ выбран телескоп с диаметром апертуры 150 мм. Его расчётный угловой дифракционный предел для длины волны 550 нм равен  $0,92''$ .

Матрица фоторегистратора ТГ, обеспечивающая поле зрения изображения  $51' \times 51'$  с разрешением  $0,92''$ , должна иметь размерность  $6652 \times 6652$  пикселей:

$$2 \cdot 51 \cdot 60 / 0,92 = 6652,$$

где коэффициент 2 определяется в соответствии с теоремой Котельникова.

Очевидно, что координаты центра цели и её контура могут смещаться от центра монитора ОТ на величину, пропорциональную размеру пикселя матрицы ТГ. Это соответствует 9–30 пикселям фоторегистраторов ОТ, угловое разрешение которых равно  $0,1'' - 0,03''$  [1]. Рассматриваемое смещение приводит к несовпадению координатных систем

$(X_o, 0_o, Y_o)$  и  $(X_{t'}, 0_{t'}, Y_{t'})$  (см. рис. 1) и определяет величину систематической погрешности наведения ОТ на цель, которая равна разрешению ТГ.

**Режимы активного и пассивного гидирования и границы области указания цели.** Для указания цели используется позиционное управление или гидирование.

При позиционном управлении указываются абсолютные небесные координаты цели. Наведение основного телескопа в определённую точку можно производить, используя его штатные датчики положения, поэтому область расположения целей не ограничена.

При указании цели с использованием гидирования вначале ТГ наводится на центр Солнца по эфемеридам. Затем вычисляются фактические координаты центра изображения Солнца и формируется сигнал рассогласования, значение которого пропорционально смещению центра Солнца относительно центра матрицы гидирования (либо смещению относительно одной из четырёх других её точек, которые будут определены далее).

Область заданных целей при гидировании ограничена размерами матрицы и требованием, чтобы на неё одновременно возможно было спроецировать изображения полного диска Солнца и цели. Это позволяет непосредственно по матрице определить расстояние от центра Солнца до цели. Предполагается, что предварительно выполнена юстировка, обеспечивающая параллельность положения осей  $X$  и  $Y$  матрицы осей азимутальной и склонения ТГ.

При активном гидировании сигнал рассогласования используется для управления поворотами ТГ так, чтобы рассогласование было равно нулю. Это произойдёт тогда, когда центр изображения Солнца совпадёт с центром матрицы гидирования. После этого оператор может указать цель курсором на мониторе ТГ. Координаты цели измеряются относительно центра матрицы гидирования, который в данном случае совпадает с центром Солнца, и определяется положение основного телескопа, в котором будет обеспечено расположение цели в центре его FOV ОТ. Визуально на мониторе ТГ можно наблюдать неподвижные изображения диска Солнца и курсора, указывающего выбранную цель.

В случае пассивного гидирования ТГ наводится на центр Солнца по эфемеридам, после чего в отличие от активного гидирования телескоп перемещается только для выполнения часового ведения. Определяется и фиксируется рассогласование в положениях центров цели и Солнца. Его величина учитывается при определении координат цели, указанной курсором, при этом сохраняется стационарное расположение цели относительно центра Солнца. Визуально на мониторе ТГ можно наблюдать синхронные перемещения изображений диска Солнца и курсора. В результате ТГ (без учёта часового ведения) неподвижен, а изменяющиеся координаты цели из-за её смещения определяют положение основного телескопа так, что цель всегда расположена в центре его поля зрения.

Обозначим стороны матрицы гидирования  $a_g$  и  $b_g$  (рис. 2), контур поля зрения ТГ (FOV ТГ) широкой зелёной линией, контур FOV ОТ прямоугольником со сторонами  $a_0$  и  $b_0$ , курсор для указания координат оператором пересекающимися ортогональными осями со стрелками, диаметр Солнца  $D_s$ . Если центр Солнца расположен в центре матрицы фоторегистратора, то можно гидировать только те цели, центр изображения которых отстоит от центра матрицы на величину не более половины её размера по каждой из координат (область  $F_0$  размером  $a_1 \times b_1$ ), например цели  $A_0$ ,  $A_1$  и  $A_2$ .

При положении диска Солнца в центре матрицы гидирования цели, расположенные вне области гидирования ( $F_0$ ), например цель  $A_3$ , не видны наблюдателю. Для их обнаружения область указания целей можно расширить до области  $F_t$ , размеры которой ( $a_2 \times b_2$ ) определяются исходя из требования обеспечить одновременно размещение полного диска Солнца и центра цели на матрице фоторегистратора. Это условие выполнено в том случае, если цель будет в FOV ТГ, а центр Солнца расположен внутри области  $F_{cs}$ , размеры

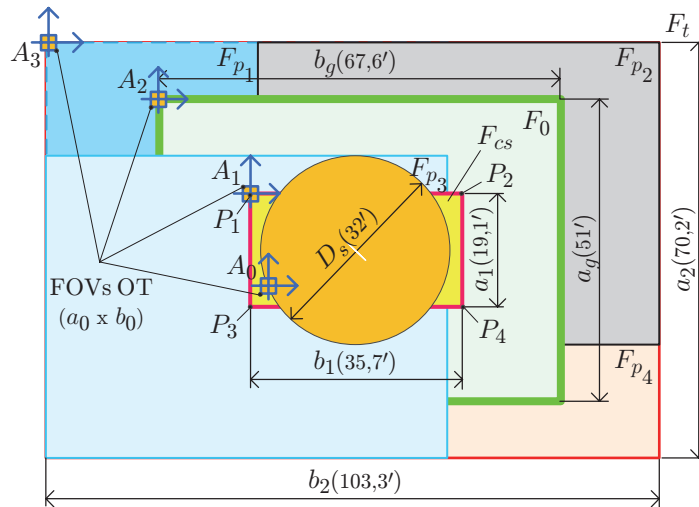


Рис. 2. Границы областей указания целей с использованием телескопа гидро-  
вания

которой  $a_1 \times b_1$ <sup>1</sup> вычисляются следующим образом:

$$a_1 = a_g - D_s; \quad b_1 = b_g - D_s. \quad (1)$$

Для того чтобы просмотреть всю область доступных для наблюдения целей  $F_t$ , достаточно поворачивать ТГ таким образом, чтобы центр матрицы фоторегистратора поочередно располагался в каждой из четырёх угловых точек  $P_1—P_4$  области  $F_{cs}$ .

Размеры  $F_t$ , обозначим их  $a_2 \times b_2$ , вычисляются в соответствии с выражениями:

$$a_2 = D_s + 2(a_g - D_s) = 2a_g - D_s; \quad b_2 = D_s + 2(b_g - D_s) = 2b_g - D_s. \quad (2)$$

Геометрические центры областей расположения центров Солнца ( $F_{cs}$ ), целей ( $F_t$ ) и области гидро-вания в положении  $F_0$  совпадают (рис. 2).

Для того чтобы наблюдать цель, выходящую за пределы  $F_0$ , но расположенную внутри границ области  $F_t$ , можно повернуть ТГ так, чтобы центр его поля зрения переместился в координаты угла области  $a_1 \times b_1$ , ближайшего к цели.

Аналогичное действие можно выполнить, если задать гидро-вание Солнца относительно точки  $P'_4$ , что приведёт к повороту трубы ТГ (активное гидро-вание), как показано на рис. 3. В результате место расположения цели  $A_3$  окажется внутри смещённой области гидро-вания  $F_{p_1}$ . Указав положение цели курсором, по матрице гидро-вания можно определить её координаты относительно точки  $P_1$ . Для вычисления смещений ОТ относительно центра Солнца указанные координаты должны быть суммированы со значениями  $x_{p_1}$  и  $y_{p_1}$ .

Предложенный метод наведения ТГ с использованием гидро-вания относительно габаритных точек области расположения центров Солнца позволяет расширить размеры области активного и пассивного гидро-вания цели до размеров области  $F_t$ .

Координаты углов (точки  $P_1—P_4$ ) в системе координат области  $F_0$  находятся из сле-

<sup>1</sup>Если пренебречь изменением величины  $D_s$  в течение года, то значения координат угловых точек области  $a_1 \times b_1$ , измеренных относительно центра матрицы гидро-вания, будут иметь постоянные значения

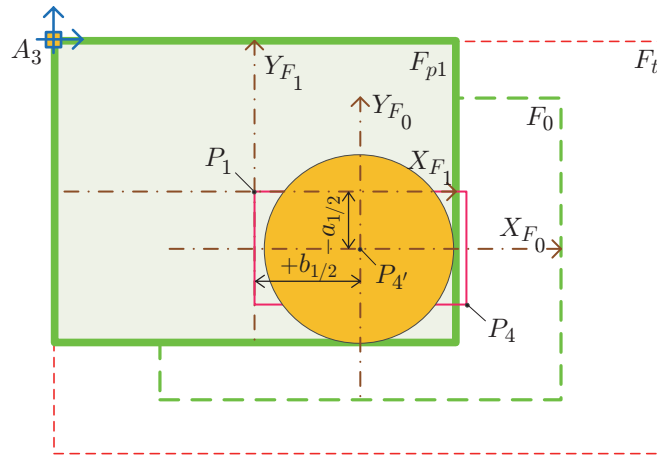


Рис. 3. Поле зрения ТГ при активном гидировании Солнца для наблюдения цели  $A_3$ , расположенной вне  $F_0$

дующих выражений:

$$\begin{aligned}
 P_1: \quad x_{p_1} &= -b_1/2, & y_{p_1} &= +a_1/2; \\
 P_2: \quad x_{p_2} &= +b_1/2, & y_{p_2} &= +a_1/2; \\
 P_3: \quad x_{p_3} &= -b_1/2, & y_{p_3} &= -a_1/2; \\
 P_4: \quad x_{p_4} &= +b_1/2, & y_{p_4} &= -a_1/2.
 \end{aligned} \tag{3}$$

При активном гидировании для компенсации смещений изображения повороты ТГ выполняются таким образом, что центр Солнца удерживается в центре FOV ТГ (т. е. в центре матрицы или в одной из точек  $P_1-P_4$ ), а цель — в её стационарном положении (рис. 4, а). При этом будут происходить колебания изображения относительно точки гидирования с частотой вычисления смещений, которая равна частоте передачи видеок кадров изображений (ориентировочно 50 Гц).

При пассивном гидировании изображения Солнца и цели будут синхронно смещаться по матрице гидирования относительно своих стационарных положений (рис. 4, б). Это обстоятельство нужно учитывать, например, при измерении спектров. При этом качество изображения на мониторе ТГ может оказаться лучше, чем при активном гидировании,

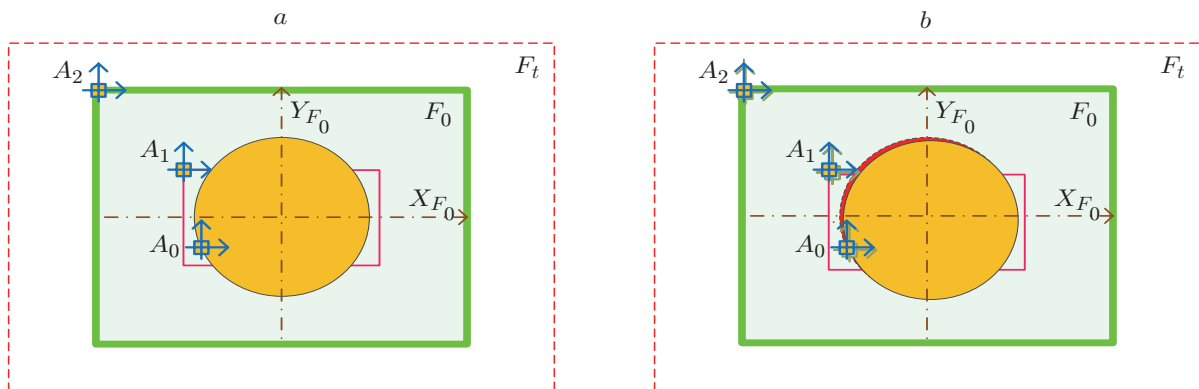


Рис. 4. Поле зрения ТГ при гидировании Солнца для наблюдения целей  $A_0-A_2$ , расположенных в  $F_0$ : активное (а), пассивное (б)

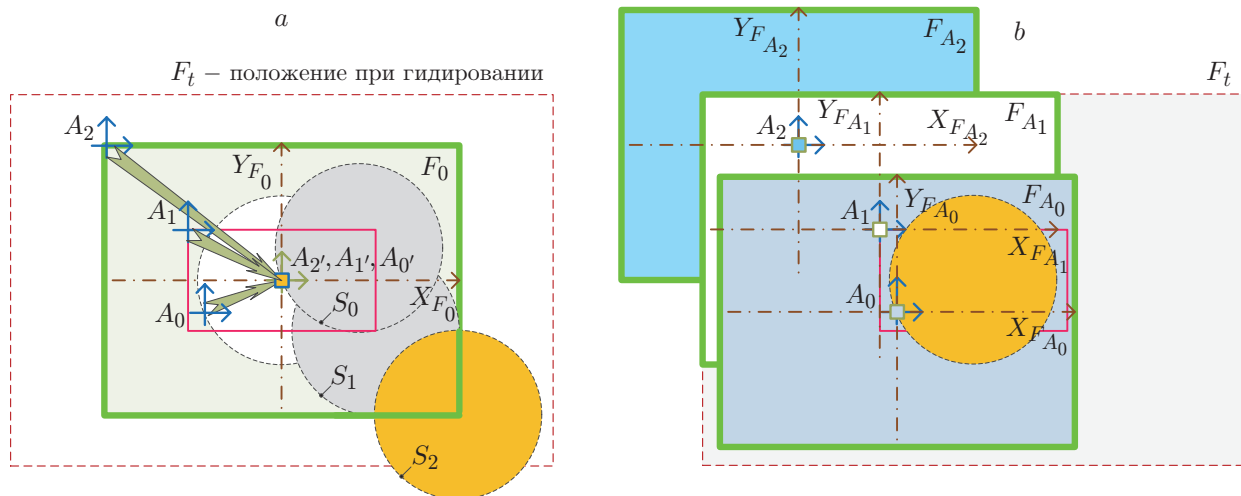


Рис. 5. Наведение ТГ в режиме выключенного гидирования на цели  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ , расположенные в области  $F_0$ : изображения цели и диска Солнца на CCD-матрице (а), положения границ FOV ТГ в гелиоцентрической системе координат (б)

так как отсутствуют колебания с частотой передачи видеокадров.

**Альтернативный вариант наведения.** С использованием стационарного взаимного расположения цели и центра Солнца может быть реализован альтернативный вариант наведения в режиме управления оператором (в [3] такой процесс называется выключенным гидированием). Для его реализации необходима предварительная юстировка ОТ и ТГ, осуществляемая таким образом, чтобы оптические оси телескопов были расположены параллельно и ориентированы каждая в центр матрицы «своего» регистратора. Расположение строк и столбцов матриц CCD (charge-coupled device или прибор с зарядовой связью — ПЗС) одинаково, их строки ориентированы вдоль суточной линии движения Солнца.

Телескоп гидирования наводится по эфемеридам на центр Солнца (рис. 5, а). Оператор курсором на мониторе ТГ выбирает цель, расположенную в области  $F_0$ , например  $A_0$ ,  $A_1$  или  $A_2$ . Подсистема управления вычисляет расстояние по матрице гидирования от исходного положения (центр Солнца,  $x = 0$ ,  $y = 0$ ) до выбранной цели. Оператор вручную перемещает курсор и сопровождающую его цель в центр FOV ТГ, при этом изображение Солнца смещается в положения  $S_0$ ,  $S_1$  или  $S_2$  при наведении соответственно на цели  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ . Положения FOV ТГ в гелиоцентрической системе координат, т. е.  $F_{A_0}$ ,  $F_{A_1}$ ,  $F_{A_2}$ , для упомянутых целей показаны на рис. 5, б. После наведения ТГ на цель оператор, используя соответствующую команду, может инициировать наведение на цель ОТ (т. е. выполнить его поворот в вычисленные координаты), что обеспечит ориентацию оптической оси ОТ в центр цели. Погрешность наведения будет пропорциональна смещению цели от центра матрицы фоторегистратора ОТ.

Как и в случае гидирования, цель может выходить за границы  $a_g \times b_g$  области  $F_0$ , но быть внутри области  $F_t$ . Тогда выбор цели в варианте выключенного гидирования будет выполнен в два шага. Например, для цели  $A_3$  (рис. 6), расположенной в области  $F_{p1}$  (см. рис. 2), на первом шаге оператор с помощью курсора перемещает точку  $P_1$  в центр FOV ТГ (шаг 1 так же может быть выполнен в режиме активного гидирования Солнца относительно точки  $P_4$ ). Если после поворота ТГ цель оказалась в его поле зрения, то на втором шаге оператор с помощью курсора указывает цель  $A_3'$ . Устройство управления

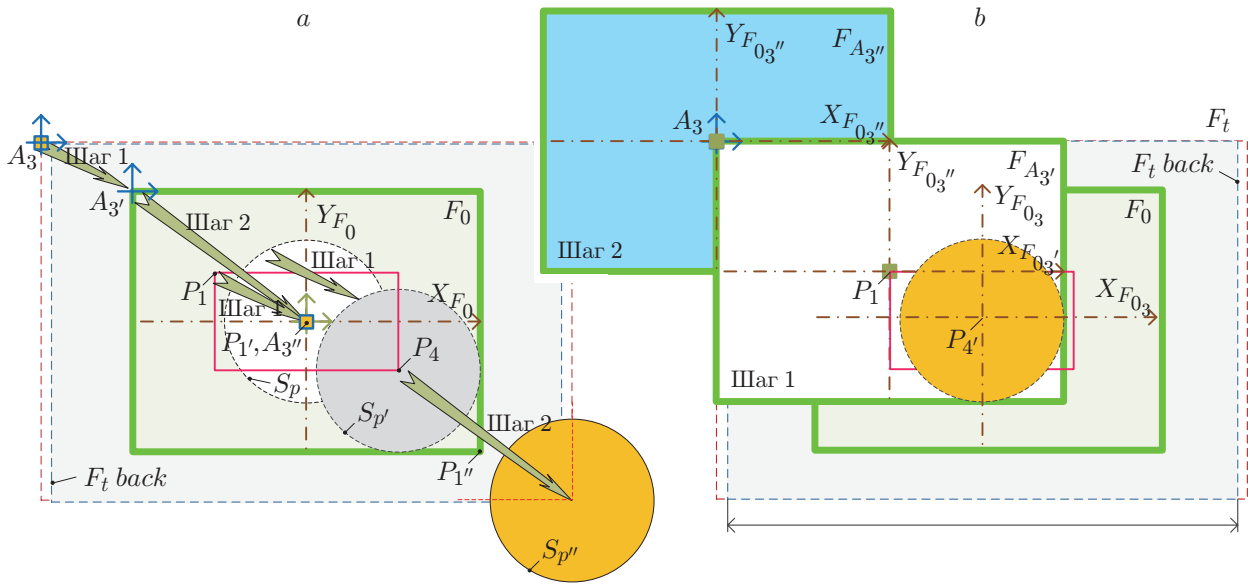


Рис. 6. Последовательность наведения ТГ на цель  $A_3$ , расположенную вне границ области  $F_0$  в режиме выключенного гидирования: шаг 1 — перемещение  $P_1$  в центр матрицы, шаг 2 — перемещение  $A_3$  в центр матрицы, изображения цели и диска Солнца на CCD-матрице (а); положения границ FOV ТГ в гелиоцентрической системе координат (б)

вычисляет расстояние от цели до центра матрицы гидирования, которое автоматически суммируется со смещением, полученным на первом шаге. Затем оператор перемещает курсор вместе с указанной целью в центр FOV ТГ.

После наведения ТГ на цель оператор специальной командой может инициировать наведение на цель ОТ.

Изображение Солнца при выбранных габаритах области  $a_2 \times b_2$  может выйти за пределы FOV ТГ (рис. 6, а, положение  $S_p''$ ). Это обстоятельство делает невозможным возвращение изображения Солнца в центр FOV ТГ, используя только механизм гидирования. Для возврата необходимо, чтобы изображение Солнца хотя бы «коснулось» любой из сторон матрицы гидирования. Это условие может быть выполнено при уменьшении размера  $b_2$  до значения  $b_{F\ back}$ , определяемого в соответствии с выражением

$$b_{F\ back} \leq b_g + D_s. \quad (4)$$

Если принять, что поле зрения ТГ равно  $51'$ , соотношение сторон матрицы фоторегистратора 3 : 4, то  $a_g = 51'$ ,  $b_g = 67,6'$ ;  $a_1 = 19,1'$ ,  $b_1 = 35,7'$ ;  $a_2 = 70,1'$ ,  $b_2 = 103,3'$ ,  $b_{F\ back} = 99,6'$ .

Следует отметить, что цель  $A_3$  (рис. 6, б), находящаяся на периферии  $F_t$  и положение которой определено относительно центра Солнца в режиме выключенного гидирования, окажется в центре поля зрения видеорегистратора ТГ. Очевидно, что в этом случае в поле зрения ТГ могут попасть объекты, расположенные за границами области  $F_t$ . Значения координат такого объекта приблизительно можно определить по матрице гидирования как смещение относительно предыдущей цели  $A_3$ . Следовательно, можно навести ТГ на цель, расположенную за границами  $F_t$ .

**Структурная схема управления процессом наведения ОТ.** В состав структурной схемы управления процессом наведения ОТ на цель входят (рис. 7): компьютер оператора ТГ (1); оператор (2); телескоп гидирования, оснащённый светочувствительной

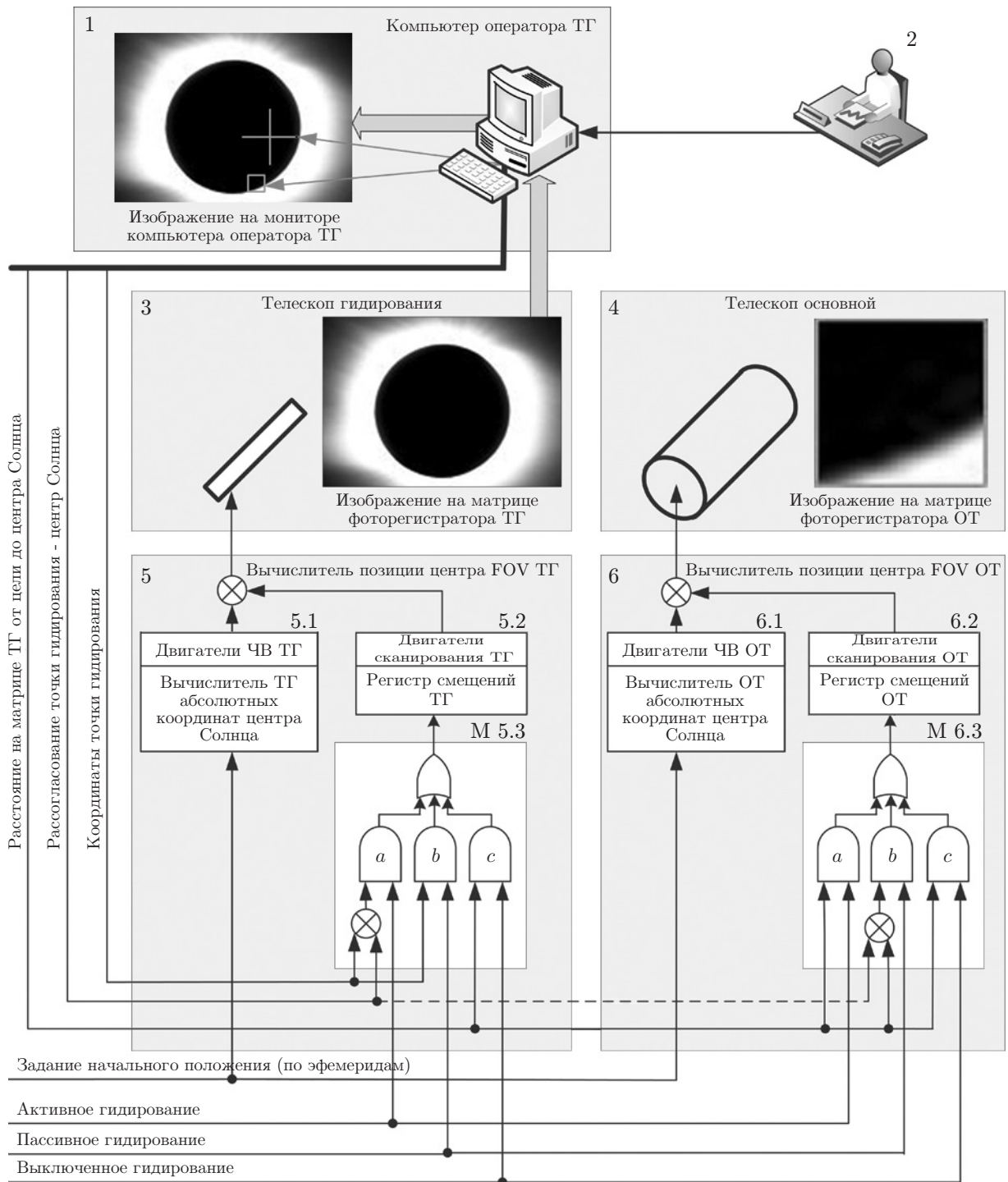


Рис. 7. Наведение ОТ на цель в режимах активного, пассивного и выключенного гидирования



прецизионной ССD-матрицей фоторегистратора (3); основной телескоп (4); вычислители позиций центров полей зрения ТГ (5) и ОТ (6), каждый из которых обеспечивает задания положения для двигателей часового ведения (ЧВ) 5.1, 6.1 и смещения для двигателей сканирования 5.2, 6.2. Смещения зависят от режима гидирования и формируются мультиплексорами М 5.3, М 6.3.

Процесс наблюдения начинается с наведения телескопов ТГ и ОТ в позицию небесной сферы, вычисленной по эфемеридам, в которой в настоящий момент времени должен находиться центр Солнца. После этого включаются двигатели часового ведения телескопов. Компьютер ТГ по изображению на матрице фоторегистратора определяет наличие изображения полного диска Солнца; вычисляет координаты центра Солнца и их отклонения по осям  $X$  и  $Y$  от центра матрицы или другой выбранной точки гидирования ( $P_1 - P_4$ ). Оператор с помощью курсора, перемещаемого по изображению солнечного диска и его окрестностей на мониторе, указывает центр цели. Компьютер управления ТГ вычисляет по координатным расстояниям цели относительно центра Солнца, эти значения фиксируются и изменяются только после выбора другой цели.

Границы поля зрения ОТ отображаются прямоугольником на мониторе оператора ТГ. При наведении ОТ на цель центр этого прямоугольника совпадает с перекрестием курсора.

Вычисление смещений ТГ и ОТ относительно координат, определяемых соответственными двигателями ЧВ ТГ и ЧВ ОТ, зависит от выбранного режима гидирования.

*Активное гидирование.* Центр изображения Солнца удерживается в центре матрицы ТГ (М 5.3а), поэтому при наведении ОТ на цель смещение его оптической оси относительно абсолютного задания определяется по координатным расстояниям на матрице ТГ от цели до центра Солнца (М 6.3а).

*Пассивное гидирование.* Телескоп гидирования относительно часового ведения неподвижен (М 5.3б), поэтому при наведении ОТ на цель смещение его оптической оси относительно абсолютного задания определяется суммой по координатным расстояниям на матрице ТГ от цели до центра Солнца и рассогласований в положениях точки гидирования и центра Солнца (М 6.3б). Указанные рассогласования могут вызвать колебания изображения в поле зрения ОТ, поэтому при наблюдениях их вклад в сумму (М 6.3б) учитывать не следует. Подключение показано пунктиром на рис. 7.

*Выключенное гидирование.* Активируется автоматически, например, при выполнении команды оператора «Направить FOV ТГ на цель». Это произойдет в тот момент, когда вычислитель обнаружит, что на матрице ТГ уже нет изображения полного диска Солнца. В этом случае фиксируются последние измеренные в процессе гидирования по координатным расстояниям на матрице ТГ от цели до центра Солнца, которые затем корректируются на величину последнего измеренного рассогласования в положениях точки гидирования и центра Солнца. Другими словами, производится последнее вычисление расстояния от центра матрицы гидирования до цели. Полученное значение впоследствии используется как фиксированное смещение цели от абсолютных небесных координат (см. рис. 7) ТГ (М 5.3с) и ОТ (М 6.3с), т. е. относительно положения телескопов, определяемого двигателями их часового ведения. В рассматриваемом примере процесс наведения осуществляется с потерей точности, так как на его завершающем этапе измерить фактическое рассогласование невозможно из-за отсутствия в FOV ТГ полного диска Солнца.

**Заключение.** Показана целесообразность использования вспомогательного телескопа гидирования, с полем зрения охватывающим диск Солнца и его окрестности, для наведения на цель основного солнечного телескопа высокого пространственного разрешения, поле зрения которого существенно меньше углового размера диска Солнца. Исследованы особенности работы ТГ в режимах активного, пассивного и выключенного гидирования. Определены границы областей гидирования и указания целей. Предложены оригинальный метод наведения ТГ, который даёт возможность расширить размеры области активного и

пассивного гидирования цели до размеров области указания цели  $F_t$  и оригинальная двухшаговая процедура обзора околосолнечного пространства для поиска целей, выходящих за пределы FOV ТГ, позволяющая упростить и ускорить нахождение цели. Приведена структурная схема наведения основного телескопа на цель в рассмотренных режимах работы телескопа гидирования.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация №АААА-А17-11706061006-6).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лубков А. А., Попов Ю. А.** Современные солнечные телескопы наземного базирования и требования к системам их автоматизации // *Автометрия*. 2019. **55**, № 1. С. 111–128.
2. **Демидов М. Л., Григорьев В. М., Чупраков С. А. и др.** Проект национального российского крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м // *Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии*. Вып. 8: Тр. X Российско-Монгольской конф. “Солнечно-земная физика и сейсмогеодинамика Байкало-Монгольского региона”. Улан-Батор, Монголия, 29 сент. — 3 окт. 2014. С. 55–67.
3. **Sobotka M., Klvana M., Melich Z. et al.** Auxiliary full-disc telescope for the European Solar Telescope // *Proc. SPIE*. 2010. **7735**. 77351Z.
4. **Daniel K.** Inouye Solar Telescope. Target Acquisition System. URL: <https://dkist.nso.edu/tel/acq> (дата обращения 17.10.2019).

*Поступила в редакцию 31.10.2019*

*После доработки 27.11.2019*

*Принята к публикации 04.12.2019*

---