

## Статистические оценки фундаментальных ограничений на применение типовых ПЗС-камер в составе ТВ-подсмотров больших оптических телескопов

В.В. Комаров, А.Ф. Фоменко

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

Поступила в редакцию 10 марта 2006 г.; принята к печати 12 мая 2006 г.

Исследуются характеристики телевизионных подсмотров на телескопах БТА и Цейсс-1000. С целью обосновать применимость серийных ПЗС-камер в подсмотровых системах больших оптических телескопов рассмотрено формирование оптических изображений системой «атмосфера + телескоп» с учетом законов фотоэлектронной статистики. Основное внимание уделено оценкам фундаментальных ограничений, накладываемых на метод телевизионного наблюдения неба сквозь турбулентную атмосферу. Указаны возможности ослабления основных ограничивающих факторов при использовании высокочувствительных ПЗС-матриц массового производства в составе телеподсмотров.

**Ключевые слова:** ТВ-подмотры, телескопы

**STATISTICAL ESTIMATES OF FUNDAMENTAL CONSTRAINTS ON THE USE OF STANDARD CCD CAMERAS IN TV GUIDE SYSTEMS OF LARGE OPTICAL TELESCOPES, by V.V. Komarov, A.F. Fomenko.** The parameters of TV guide cameras of the BTA and Zeiss-1000 telescopes are analyzed. The formation of optical images by the “atmosphere + telescope” system is analyzed with allowance for the laws of photoelectron statistics in order to justify the applicability of commercial CCD cameras in the guiding systems of large optical telescopes. The analysis focuses on the estimates of fundamental constraints imposed on the method of TV observations of the sky through a turbulent atmosphere. The possible ways of reducing the main constraining factors in the case of the use of highly sensitive commercially produced CCDs in TV guide cameras are outlined.

**Key words:** TV guiding systems – telescopes

### Введение

Для больших оптических телескопов САО РАН с 1976 года разработано более двух десятков специализированных телевизионных подсмотров (ТВП), которые предназначены для визуализации, отождествления и гидирования исследуемых объектов. В настоящее время каждую ночь в наблюдательном процессе участвует 7 и более высокочувствительных телесистем. Каждый разработанный подсмотр является уникальным и обладает одноэлектронной чувствительностью. Последние наши разработки ТВП (Fomenko et al., 2003) ориентированы на применение серийно выпускаемых телевизионных камер с высокочувствительными ПЗС-матрицами массового производства. Высокая чувствительность и большой динамический диапазон

в новых телеподмотрах достигаются за счет охлаждения ПЗС-матриц и управления режимами усиления и накопления.

В данной работе в рамках теории формирования оптических изображений системой “атмосфера + телескоп” с учетом фотоэлектронной статистики проводится анализ параметров телевизионных подсмотров БТА и Цейсс-1000 с целью обоснования применимости типовых ПЗС-камер в качестве телеподсмотров больших оптических телескопов. Для этого необходимо определить ограничения, накладываемые на телевизионные наблюдения ночного неба сквозь турбулентную атмосферу. Основными ограничительными факторами телеподсмотров являются узкий динамический диапазон и низкое отношение сигнал/шум при наблюдении

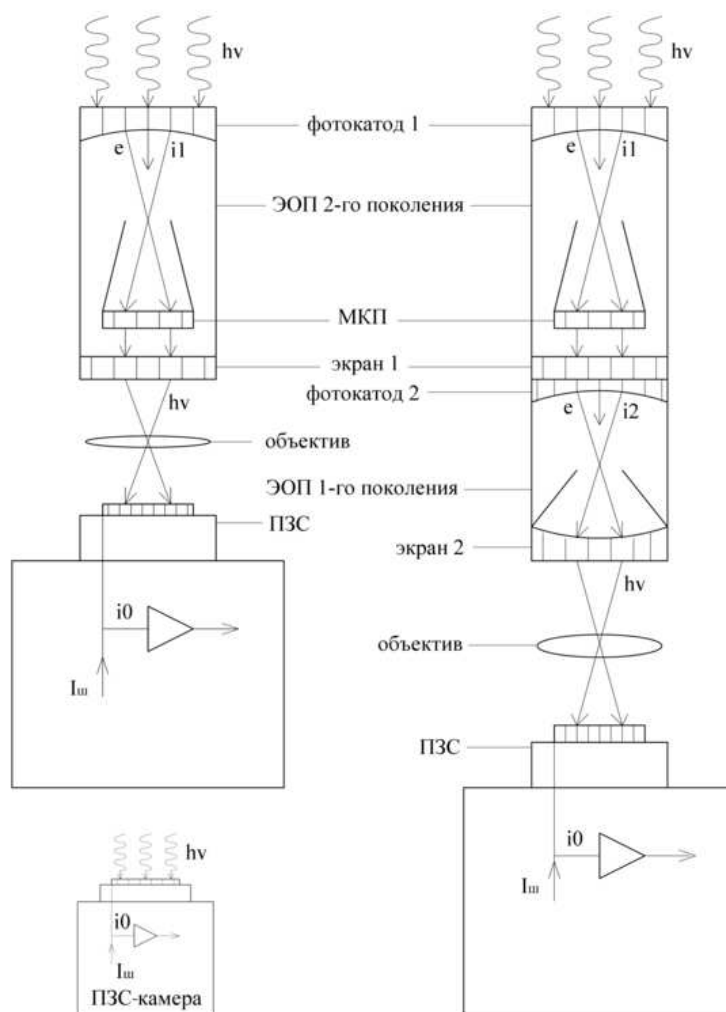


Рис. 1: Модификации телеподсмотров. Слева сверху: ICCD с ЭОПом 2-го поколения; справа: I-ICCD с ЭОПом 1-го и 2-го поколения; внизу: CCD (ПЗС) неохлаждаемая камера.

ниях слабых объектов. Сделав численные оценки фундаментальных ограничений на применение серийных ПЗС-систем для БТА и Цейсс-1000, можно указать возможности их ослабления при использовании высокочувствительных ПЗС массового производства. Если новые ПЗС-системы соответствуют требованиям, предъявляемым к работе подсмотрных устройств БТА и Цейсс-1000, то на их основе можно будет создавать унифицированные телеподсмотр для больших оптических телескопов, перейдя на новую серийно выпускаемую продукцию.

В гл. 1 описаны действующие телесистемы БТА и Цейсс-1000. Гл. 2 посвящена статистическому анализу телевизионных подсмотров на больших оптических телескопах. Статистические оценки фундаментальных ограничений на применение телеподсмотров для БТА и Цейсс-1000 и на ис-

пользование типовых ПЗС в составе таких подсмотров даны в гл.3 и 4. В гл.5 представлены новые разработки телеподсмотров с серийными ПЗС-камерами для БТА и Цейсс-1000.

### 1. Действующие подсмотрные системы БТА и Цейсс-1000

Основная функция телеподсмотров в фокусах больших оптических телескопов — обеспечить наблюдателю возможность дистанционного отождествления и визуального контроля исследуемого звездного поля. Разработанные программы автогидирования по цифровому видеоизображению (Комаров и др., 2002) позволяют вносить коррекцию в систему ведения БТА, что увеличивает точность удержания исследуемых объектов в определенном положении во время наблюдения. По-

Таблица 1: Телевизионные подсмотры БТА и Цейсс-1000

№	Место установки	Конфигурация камеры	Примечание
1	поле Н1 БТА	ICCD <sup>1</sup>	
2	поле Н2 БТА	ICCD	
3	поле ПФ БТА	ICCD	
4	поле ПФ БТА	CCD	тест-камера
5	щель ПФ БТА	ICCD	UAGS
6	70-см гид БТА	CCD	телегид
7	окрестности БТА	CCD	круглосуточный обзор неба
8	фокус Кассегрена Цейсс-1000	ICCD	UAGS
9	фокус куде Цейсс-1000	ICCD	CEGS

<sup>1</sup> – конфигурация камеры ICCD обозначает телеподсмотр (ЭОП + ПЗС), показанный на рис.1.

этому требования, предъявляемые к оптическим приемным устройствам видеосети БТА, для данного типа подсмотров являются самыми высокими. Телевизионные камеры должны работать в режиме регистрации одноэлектронных событий, т.е. обладать высокой чувствительностью, большим динамическим диапазоном и возможностью передавать видеоизображение в реальном времени. Поэтому все телеподсмотры в фокусах БТА и Цейсс-1000 содержат в качестве входного элемента электронно-оптический преобразователь (ЭОП), который определяет чувствительность всей телевизионной системы в целом. Телеподсмотры, выполняющие вспомогательную функцию (обзор больших площадок звездного неба), для которых возможны длительные экспозиции, в качестве входного элемента используют высокочувствительные малоформатные ПЗС. На рис.1 показаны типы телеподсмотров, разработанные для БТА и Цейсс-1000. Основные параметры телесистем описаны ранее (Комаров et al., 2002a). В настоящее время на БТА и Цейсс-1000 работает более десятка постоянно действующих телеподсмотров. Основные из них перечислены в табл. 1.

Специфика работы телеподсмотров на оптических телескопах заключается в необходимости регистрировать слабый сигнал на уровне шума. При наблюдении слабых объектов телеподсмотры работают в режиме предельной одноэлектронной чувствительности, когда изображения звезд на экране видеоконтрольного устройства (ВКУ) формируются небольшим числом одноэлектронных событий и сильно флуктуируют из-за турбулентности атмосферы. Случайный характер распространения световых волн в турбулентной атмосфере и дополнительные флуктуации, возникающие при приеме и обработке сигнала в телеканалах при наблюдениях на оптических телескопах, требуют

статистического подхода при описании процессов формирования и регистрации изображений астрономических объектов. Поэтому проведение статистического анализа характеристик телеподсмотров позволит определить ограничения, накладываемые на применение телекамер в наблюдательном процессе на БТА и Цейсс-1000.

## 2. Статистический анализ характеристик телеподсмотров БТА и Цейсс-1000

Статистика волновых aberrаций на входной апертуре телескопа и связанная с ней статистика флуктуаций изображения в фокальной плоскости телескопа (на приемнике изображения) определяет эффективность работы телеподсмотров. Проанализируем процесс формирования изображений астрономических объектов системой “атмосфера + телескоп” на основе статистического анализа структуры оптического поля в фокальной плоскости телескопа. При этом будем учитывать распространение света в неоднородной атмосфере до плоскости апертуры телескопа и дифракцию света на апертуре телескопа.

Фон неба, термоэлектронная эмиссия первого фотокатода, процесс поэлементного считывания, усиление и оцифровка видеосигнала вносят в процесс фотодетектирования аддитивные шумы, которые снижают контраст изображения. Статистический анализ характеристик телеподсмотров с учетом этого обстоятельства и привлечением двух статистик — атмосферной и фотоэлектронной — позволит оценить реальные возможности и ограничения, накладываемые на работу подсмотров в наблюдениях на больших оптических телескопах.

### Функция рассеяния точки

В подсмотровых системах больших оптических телескопов оптические изображения в основном формируются от точечных внеатмосферных источников. Поле светового излучения  $V(\vec{x}, t, \lambda)$  от точечного монохроматического источника искажается атмосферой и в гауссовом приближении описывается логарифмически нормальным законом распределения с нулевым средним  $\langle V \rangle = 0$  и функцией когерентности поля

$$G_V = \langle I_m \rangle \cdot g_x \cdot g_t \cdot g_\lambda,$$

где  $\langle I_m \rangle = |V_m|^2$  — средняя интенсивность светового поля  $V_m$  от точечного объекта звездной величины  $m$ , а  $g_x, g_t, g_\lambda$  — нормированные функции когерентности по пространственной, временной и спектральной переменным соответственно (Татарский, 1967).

В плоскости входной апертуры телескопа поле  $V(\vec{x}', t, \lambda)$  определяется функцией когерентности

$$G_V(\vec{x}'_1, \vec{x}'_2, t_1, t_2, \lambda_1, \lambda_2) = \langle I_m \rangle \times \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[6.88\left(\frac{|\vec{x}'_1 - \vec{x}'_2|}{r_0}\right)^{5/3} + \left(\frac{t_1 - t_2}{\tau_c}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda}\sigma_p\right)^2\right]\right\}. \quad (1)$$

Из (1) следуют соотношения для нормированных функций когерентности:

$$g_x(\vec{x}'_1, \vec{x}'_2) = \exp\left[-3.44\left(\frac{|\vec{x}'_1 - \vec{x}'_2|}{r_0}\right)^{5/3}\right] \quad (2)$$

— мгновенная нормированная пространственная функция когерентности;  $r_0$  — радиус корреляций атмосферных искажений волнового фронта (параметр Фрида), определяемый выражением для площади атмосферной когерентности  $A_a$ , где  $A_a = \frac{\pi r_0^2}{4} \int g_x(\vec{\Delta x}) d(\vec{\Delta x})$  (рис.2);

$$g_t(t_1, t_2) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t_1 - t_2}{\tau_c}\right)^2\right]$$

— нормированная временная функция когерентности, где  $\tau_c = 0.36/\sqrt{\text{var}(\nu)}$  — время атмосферной когерентности;  $\nu$  — случайная скорость воздушных масс;  $\text{var}(\nu)$  — дисперсия скорости  $\nu$ ;

$$g_\lambda(\lambda_1, \lambda_2) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda}\sigma_p\right)^2\right]$$

— нормированная спектральная корреляционная функция, где  $\lambda$  — средняя длина волны оптического сигнала в интервале длин волн  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \ll \lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ ,  $\sigma_p$  — дисперсия фазы.

Мгновенная интенсивность светового поля в изображении точечного источника  $S(\vec{x}, t)$  является функцией рассеяния точки (ФРТ) системы “атмосфера + телескоп”, которая флуктуирует в пространственно-временной области, создавая тем самым спекл-интерференционную картину в изображении точечного объекта (рис.2), наблюдаемого через турбулентную атмосферу.

Если диаметр телескопа  $D$  значительно превышает масштаб турбулентности в атмосфере  $r_0$ , т.е.  $D/r_0 \gg 1$ , то комплексный сигнал  $V(\vec{x}, t)$  в фокальной плоскости телескопа является асимптотически циркулярно-симметричным гауссовым процессом с нулевым средним (Бакут и др., 1986). В этом случае моменты интенсивности поля  $S(\vec{x}, t) = |V(\vec{x}, t)|^2$  любого порядка  $N$  полностью определяются через функцию когерентности поля  $G_V$  порядка (1,1) (Рытов и др., 1978):

$$G_V^{1,1}(\vec{x}_1, \vec{x}_2, t_1, t_2) = \langle V(\vec{x}_1, t_1) \cdot V^*(\vec{x}_2, t_2) \rangle = I_m \cdot g_t(t_1, t_2) \iint g_x(\vec{x}'_1, \vec{x}'_2) M(\vec{x}'_1) M(\vec{x}'_2) \times \exp[-j\frac{2\pi}{\lambda f}(\vec{x}'_1 \vec{x}_1 - \vec{x}'_2 \vec{x}_2)] d\vec{x}'_1 d\vec{x}'_2, \quad (3)$$

где  $f$  — фокусное расстояние, а апертурная функция телескопа

$$M(\vec{x}') = \begin{cases} 1, & |\vec{x}'| < D/2 \\ 0, & |\vec{x}'| > D/2. \end{cases}$$

Определим среднее значение функции рассеяния точки (ФРТ) 1-го порядка ( $N=1$ ). Средняя ФРТ системы “атмосфера + телескоп” находится из (3) при  $x_1 = x_2 = x$ ,  $t_1 = t_2$  и подстановкой (2) с заменой показателя степени  $5/3$  на 2:

$$S(\vec{x})/S(0) = G_V^{1,1}(\vec{x}_1, \vec{x}_2, t_1, t_2) \times G_V^{1,1}(0, 0, 0, 0) \cdot \exp(-x^2/2\sigma^2), \quad (4)$$

где  $\sigma = 0.5\lambda f/r_0$ .

Выражение (4) описывает профиль среднего изображения звезды при длительном накоплении. Среднее качество изображения звезды:

$$\omega \sim \lambda/r_0 \text{ (в угл. сек)}, \quad d \sim \lambda f/r_0 \text{ (в мм)}.$$

В зависимости от состояния атмосферы величина параметра Фрида  $r_0$  в видимом диапазоне волн изменяется от 5 до 50 см с наиболее вероятным значением 10 – 20 см.

Рассмотрим статистику функции рассеяния точки второго порядка ( $N=2$ ). Моменты второго порядка случайной интенсивности  $S(\vec{x}, t)$  характеризуют конкретные реализации формируемого

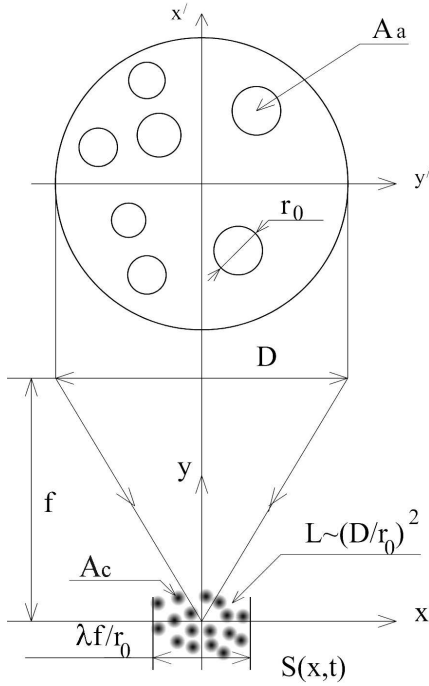
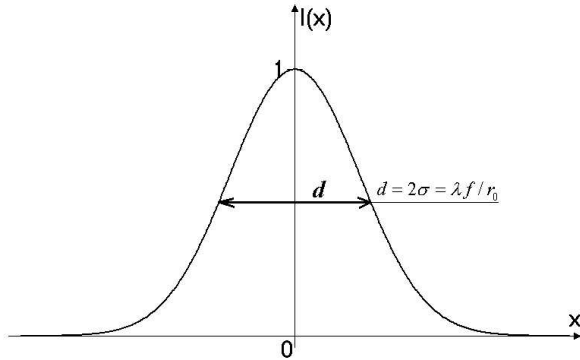
Рис. 2: Спекл-интерференционная картина  $S(x,t)$ .

Рис. 3: Профиль среднего кружка рассеяния в фокальной плоскости телескопа.

спекл-изображения в фокальной плоскости телескопа (рис. 3) и выражаются через функцию когерентности:

$$G_s^{(2)}(\vec{x}_1, \vec{x}_2, t_1, t_2) = \langle S(\vec{x}_1) \rangle \cdot \langle S(\vec{x}_2) \rangle + |G_V^{1,1}(\vec{x}_1, \vec{x}_2, t_1, t_2)|^2 \cdot c, \quad (5)$$

где  $c$  — константа, а  $S(\vec{x})$  и  $G_V^{1,1}$  даются уравнениями (3) и (4).

Получим оценку пространственной корреляционной ячейки (площадь спекла):

$$A_c = \int |g_V^{1,1}(\vec{\Delta x})|^2 d(\vec{\Delta x}), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{где} \quad g_V^{1,1}(\vec{x}_1 - \vec{x}_2) &= G_V^{1,1}(\vec{x}_1, \vec{x}_2, t_1, t_2) \times \\ &\times \left[ G_V^{1,1}(\vec{x}_1, \vec{x}_1, t_1, t_1) \cdot G_V^{1,1}(\vec{x}_2, \vec{x}_2, t_2, t_2) \right]^{-1/2} = \\ &= \text{besinc}\left(\frac{\pi(\vec{x}_1 - \vec{x}_2)D}{\lambda f}\right) \exp\left[j\frac{\pi(\vec{x}_1^2 - \vec{x}_2^2)}{\lambda f}\right], \end{aligned} \quad (7)$$

а  $\text{besinc} = 2J_1(y)/y$ , где  $J_1(y)$  — функция Бесселя первого порядка.

Выражение (7) определяет нормированную функцию пространственной когерентности поля в фокальной плоскости телескопа и позволяет получить оценки пространственной корреляционной ячейки  $A_c$  и масштаба поперечной пространственной когерентности в картине спеклов  $d_c$  (так называемого кружка Эри):

$$A_c = 4\lambda^2 f^2 / \pi D^2, \quad d_c = \lambda f / D.$$

Таким образом, мгновенное изображение точечного объекта представляет собой двумерную интерференционную картину из совокупности  $L \sim (D/r_0)^2$  пятен (тождественно — спеклов) с характерным размером  $d_c$  (рис.2), а сами спеклы рассеяны в пределах области  $\langle S(x) \rangle$  размером  $d = \lambda f / r_0$  (рис.3).

Итак, пространственно-временная структура ФРТ  $S(\vec{x}, t)$  имеет следующие компоненты во временной области:

1) быстрая составляющая  $\tau_c = 0.36 \frac{r_0}{\sqrt{\text{var}(\nu)}}$ , которая известна как время жизни (“кипения”) спеклов;

2) медленная составляющая  $\tau_0 \sim D/\langle \nu \rangle$ , которая характеризует масштаб дрожания изображения звезды как целого.

Если скорость ветра  $\nu$  флуктуирует так, что дисперсия турбулентных скоростей  $\text{var}(\nu) \sim \sqrt{\text{var}(\nu)}$ , то для больших оптических телескопов выполняется условие  $\tau_0 \gg \tau_c$ , т.к.  $D/r_0 \gg 1$ . Следовательно, динамику изображения звезды в реальном времени (для очень коротких экспозиций) определяет время жизни спеклов  $\tau_c$  на фоне медленно меняющейся составляющей с масштабом  $\tau_0$ . При этом под короткими экспозициями необходимо понимать время накопления изображения на фотоприемнике, которое значительно меньше характерного времени турбулентных дрожаний атмосферы.

Оценим составляющие ФРТ для типичных атмосферных условий на БТА. Задав величины  $r_0 \approx 10$  см,  $\sqrt{\text{var}(\nu)} \approx \langle \nu \rangle \approx 5$  м/с и  $D = 6$  м, найдем значения быстрой и медленной временных составляющих ФРТ:  $\tau_c \approx 0.01$  с,  $\tau_0 \approx 1$  с.

В пространственной области ФРТ характеризуется двумя масштабами:

1) “острый” масштаб пространственной корреляции, равный среднему размеру спекла

$$d_c = \lambda f / D;$$

2) “плавный” пространственный масштаб двумерной огибающей среднего диска рассеяния звезды

$$d = \theta f = \lambda f / r_0.$$

Этот масштаб характеризует функцию рассеяния точки системы “атмосфера + телескоп” при длительных накоплениях изображений звезд. При этом изображение звезды с длительной экспозицией, превышающей характерное время турбулентных дрожаний атмосферы, определяет среднее качество изображения.

Оценим пространственные составляющие ФРТ для БТА. При условии  $r_0 \approx 10$  см,  $f = 24$  м,  $D = 6$  м,  $\lambda_0 = 0.5$  мкм масштабы корреляции составят  $d_c \approx 2$  мкм,  $d \approx 120$  мкм или  $\theta \approx 1$  угл.сек. Тогда количество спеклов  $L \approx 3600$ .

Располагая оценками пространственно-временных масштабов корреляций в оптическом изображении и сопоставляя их с техническими параметрами телевизионных подсмотров, такими как площадь пикселя  $A = XY$ , время экспозиции  $T$  и длительность кадра  $T_K$ , можно сделать вывод о характере фотоэлектронной статистики в телевизионных подсмотрах, для которых типичны значения:  $7 < X, Y < 60$  мкм,  $T_K = 0.02$  с,  $0.02 < T < 2/3$  с.

### Фотоэлектронная статистика при фотодетектировании оптических изображений

Располагая моделью оптического поля в изображении (см. рис.2), можно найти статистические характеристики случайного числа первичных фотоэлектронов  $n$  в объеме выборки  $T A \Delta \lambda$  при произвольных значениях  $T/\tau_c$ ,  $A/A_c$  при  $\Delta \lambda / \lambda < 1$ .

Средний поток фотонов, собираемых апертурой телескопа, можно определить из выражения

$$I_m = \langle |V_m|^2 \rangle \approx \frac{\pi D^2}{4} \eta I_0 \cdot 10^{-0.4m} \Delta \lambda, \quad (8)$$

где  $\eta$  — средний коэффициент пропускания системы “атмосфера + телескоп”;

$I_0$  — внеатмосферный поток фотонов от звезды нулевой звездной величины ( $m = 0$ ),

$I_0 \approx 10^3$  (фотон/см<sup>2</sup>/Å/с);  $\Delta \lambda$  — спектральный диапазон фотодетектирования (Å). Разделив (8) на среднюю площадь изображения звезды  $\pi d^2/4$ , где  $d \sim \lambda f/r_0$ , получим значение среднего потока фотонов на фотоприемнике в фокальной плоскости телескопа:

$$\langle S_m \rangle = S_m = \frac{4I_m}{\pi d^2} \approx \left( \frac{D}{d} \right)^2 \cdot 10^{-0.4m} \cdot \eta I_0 \Delta \lambda. \quad (9)$$

В предельном случае ( $A/A_c \ll 1, \tau/\tau_c \ll 1$ ) характер флуктуаций  $S(x, t)$  около своего среднего  $\langle S_m \rangle$  подчиняется плотности вероятности экспоненциального вида:

$$P(S) = (1/\langle S \rangle) \exp(-S/\langle S \rangle) \quad (10)$$

с начальными моментами

$$\langle S^m \rangle = m! \langle S \rangle^m, \quad (11)$$

которые определяют контраст в картине спеклов:

$$K = \text{var}(S)/\langle S \rangle^2 = [\langle S^2 \rangle - \langle S \rangle^2]/\langle S \rangle^2. \quad (12)$$

Для  $K = 1$  контраст характеризует полностью развитое спекл-изображение звезды. Следует подчеркнуть, что условие  $AT \ll A_c \tau_c$  реализуется тогда, когда фокус телескопа  $f$  велик, а размер пикселя телеподсмотра и время выборки  $T$  минимальны. Фактически эта система описывает квази-спекл-интерферометрический режим работы ТВП, например во вторичных фокусах БТА и в фокусе куде Цейсс-1000. При этом случайное число фотоэлектронов  $n$  в отдельном пикселе описывается распределением Бозе-Эйнштейна:

$$p(n) = \frac{\langle n \rangle}{(1 + \langle n \rangle)^{n+1}}, \quad (13)$$

где  $\langle n \rangle = \alpha T A S_m$  — среднее число фотоэлектронов в пикселе площадью  $A$ , накопленное за время  $T$ ;  $\alpha$  — средняя квантовая эффективность фотокатода.

Дисперсия этого распределения

$$\text{var}(n) = \langle n \rangle (1 + \langle n \rangle) \quad (14)$$

больше пуассоновской дисперсии  $\text{var}(n) = \langle n \rangle$  на величину  $\langle n \rangle^2$ , и при  $\langle n \rangle \ll 1$  стремится к 0. Таким образом, только при очень маленьком объеме выборки  $AT$  и малой интенсивности  $\langle S_m \rangle$  имеет место пуассоновская фотоэлектронная статистика, обусловленная природой фотодетектирования.

В случае конечной площади пикселя  $A$  и конечной длительности экспозиции  $T$  контраст в картине спеклов уменьшается до уровня

$$K = 1/N_T \cdot N_A, \quad (15)$$

где  $N_T > 1, N_A > 1$  и происходит замывание изображения спеклов.

$N_T$  — число степеней свободы временных флуктуаций поля за время экспозиции  $T$ ;

$N_A$  — число степеней свободы пространственных флуктуаций поля в пределах площади пикселя  $A$ . С достаточной степенью точности можно записать (Saleh, 1978):

$$N_T \approx 1 + T/\tau_c, \quad N_A \approx 1 + A/A_c. \quad (16)$$

Располагая сведениями о величинах  $N_T$  и  $N_A$ , можно оценить степень отклонения статистики первичных фотоэлектронов от пуассоновской. Следует отметить, что если параметр  $N_T$  сильно зависит через  $\tau_c$  от погодных условий и выбора экспозиции  $T$ , то параметр  $N_A$  определяется типом телеподсмotra и относительным отверстием телескопа  $F = f/D$ .

Степень отклонения от пуассоновской статистики при произвольных  $A/A_c$  и  $T/\tau_c$  характеризуется дисперсией потока первичных фотоэлектронов (Saleh, 1978):

$$\text{var}(n) = \langle n \rangle \left( 1 + \frac{\langle n \rangle}{N_T \cdot N_A} \right). \quad (17)$$

Второй член в (17) отражает избыточный шум в ТВП из-за атмосферных флуктуаций. Чтобы статистика  $n$  была пуассоновской, необходимо выполнение условия:

$$\langle n \rangle \ll N_T \cdot N_A = N. \quad (18)$$

### Численные оценки параметров оптических изображений на БТА и Цейсс-1000

Телевизионные подсмотры на больших оптических телескопах работают, как правило, в области предельной чувствительности, когда оптическое изображение определяется малым количеством фотонов, а видеоизображение имеет, главным образом, шумовую составляющую. Вероятность регистрации  $n$  квантов в этом случае подчиняется с большой точностью статистике Пуассона:

$$P(n) = \langle n \rangle^n \exp(-\langle n \rangle) / n!. \quad (19)$$

Определим рабочую область телеподсмotra с пуассоновской статистикой первичных фотоэлектронов для БТА и Цейсс-1000. Задав 10%-ю погрешность отклонения от пуассоновского распределения  $\langle n \rangle / N \leq 0.1$ , оценим диапазон изменений  $\langle n \rangle$  и время экспозиции  $T$ , при которых обеспечивается пуассоновский режим фотодетектирования. Для начала зададим исходные параметры:

фокус телескопа	–	$f$ ,
диаметр телескопа	–	$D$ ,
относительное отверстие	–	$F = f/D$ ,
время жизни спеклов	–	$\tau_c$ ,
площадь пикселя	–	$A = XY$ ,
время накопления изображения	–	$T$ ,
время кадровой развертки (в сек)	–	$T_K = 0.02$ ,
средняя квантовая эффективность фотокаатода ТВП	–	$\alpha \approx 0.05$ ,
интервал длин волн чувствительности фотокаатода с центральной длиной волны $\lambda = 0.5$ мкм (в мкм)	–	$\Delta\lambda \approx 0.3$ ,
средний коэффициент поглощения фотонного потока атмосферой и оптикой телескопа	–	$\eta \approx 0.5$ ,
внеатмосферный поток фотонов от звезды $m = 0$ (фотон/см <sup>2</sup> /Å/с)	–	$I_0 = 1000$ ,
среднее качество изображения	–	$\theta = 2''$ ,
средний диаметр изображения (в мм)	–	$d = \theta \cdot f$ .

В этих условиях среднее число первичных фотоэлектронов в объеме выборки  $AT$  от звезды со зв. величиной  $m$  равно

$$\begin{aligned} \langle n_m \rangle &= \alpha \eta \cdot 10^{-0.4m} \cdot I_0 \cdot AT \Delta\lambda D^2 / d^2 = \\ &= \alpha \eta 10^{-0.4m} \cdot I_0 \cdot AT \Delta\lambda D^2 / (\theta f)^2 = \\ &= \alpha \eta 10^{-0.4m} \cdot I_0 \cdot AT \Delta\lambda / (\theta F)^2. \end{aligned} \quad (20)$$

Для первичного фокуса БТА с телевизионными подсмотрами ICCD с ЭОПом 2-го поколения (см. табл.1 и рис.1) исходные параметры примут значения:  $f = 24$  м,  $A = XY = 30 \times 40$  мкм<sup>2</sup> =  $1.2 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>,  $A_c \approx (\lambda f/D)^2 \approx 4$  мкм<sup>2</sup>,  $d = 0.24$  мм,  $T = T_K = 0.02$  с,  $\tau_c \sim 0.01$  с, тогда

$$\begin{aligned} N_A &\approx 1 + A/A_c \approx 300, \\ N_T &\approx 1 + T/\tau_c \approx 3, \\ \langle n_{max} \rangle &< 0.1 N_A N_T \approx 90 e^-. \end{aligned}$$

Из формулы (20) находим граничную звездную величину, наблюдаемую с помощью телеподсмotra в первичном фокусе БТА, при которой еще обеспечивается пуассоновский режим фотодетектирования:  $m > 12$ .

Для вторичных фокусов БТА с телевизионными подсмотрами ICCD с ЭОПом 1-го поколения (см. табл.1 и рис.1) исходные параметры примут значения:  $f = 180$  м,  $A = XY = 60 \times 70$  мкм<sup>2</sup> =  $4.2 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>,  $A_c \approx (\lambda f/D)^2 \approx 225$  мкм<sup>2</sup>,  $T = T_K = 0.02$  с,  $\tau_c \approx 0.01$  с, тогда

$$N_A \approx 1 + A/A_c \approx 20,$$

$$N_T \approx 1 + T/\tau_c \approx 3, \\ \langle n \rangle < 0.1 N_A N_T \approx 6e^-.$$

Средний размер изображения звезды в фокусах Н1 и Н2 составит  $d \approx 5 \cdot 10^{-6} \cdot \theta f \approx 1.8$  мм. Тогда при  $\langle n_m \rangle \approx \langle n_{max} \rangle = 6e^-$  из формулы (20) находим граничную зв. величину, наблюдаемую с помощью ТВП во вторичных фокусах БТА, при которой еще обеспечивается пуассоновский режим фотодетектирования:  $m > 12.5$  зв. величины.

Для более ярких звезд пуассоновская статистика нарушается. В соответствии с (17), кроме фотонного шума  $\sigma = \sqrt{\langle n \rangle}$  для  $m < 12.5$  заметный вклад в сигнал будет вносить шум  $\langle n \rangle^2 / N_A N_T$ , обусловленный атмосферной статистикой.

Для первичного фокуса 1-м телескопа Цейсс-1000 с телевизионными подсмотрами ICCD с ЭОПом 2-го поколения или накопительными ПЗС-камерами (см. табл.1 и рис.1) исходные параметры примут значения:  $f = 12$  м,  $A = 1.5 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>,  $A_c \approx (\lambda f/D)^2 \approx 1$  мкм<sup>2</sup>,  $d = 0.12$  мм,  $T_1 = T_K = 0.02$  с (для ТВП с непрерывной разверткой),  $T_2 = 1$  с (для ТВП с накопительным фотоприемником). Тогда

$$N_A \approx 1200, \\ N_T \approx 3 \text{ при } T_1 = T_K, \\ N_T \approx 100 \text{ при } T_2, \\ \langle n_{max} \rangle \approx 0.1 N_A \cdot N_T \approx 360e^- (T_1 = T_K) \text{ или} \\ \langle n_{max} \rangle \approx 12000e^- (T_2 = 1 \text{ с}).$$

Различные схемы телеподсмотров в первичном фокусе 1-м телескопа Цейсс-1000 дают различные значения ограниченной сверху звездной величины, при которой еще обеспечивается пуассоновский режим фотодетектирования:

$m_1 > 10$  для ТВП с непрерывной разверткой или  
 $m_2 > 6$  для ТВП с накопительным фотоприемником.

Таким образом, рабочая область ТВП с пуассоновской статистикой первичных фотоэлектронов охватывает значительную долю звезд, наблюдаемых на БТА и Цейсс-1000. Для протяженных объектов эти ограничения менее жесткие.

### 3. Статистические оценки фундаментальных ограничений на применение телевизионных подсмотров для БТА и Цейсс-1000

Считая статистику первичных фотоэлектронов пуассоновской, можно оценить ряд предельных параметров телевизионных подсмотров для БТА и Цейсс-1000.

Подобные оценки для видиконных телекамер приводились в публикациях неоднократно, но наиболее полный анализ для ТВП типа I-SIT (ЭОП с видиконом) выполнен в работе Mengers (1975).

Подход, разработанный в ней, использован нами для оценок параметров ТВП на БТА и Цейсс-1000 и распространен на модификации ICCD-телекамер.

### Шумы и отношение сигнал/шум

#### Сигнал

Как было показано выше, средний сигнал от звезды со звездной величиной  $m$  определяется по формуле (20). Для любого типа телеподсмотра случайные величины  $n_m$  статистически независимы, а их флуктуации создают в сигнале фундаментальный фотонный шум фотодетектирования. Одиночный первичный фотоэлектрон из пакета  $\langle n_m \rangle$  в телеподсмотре модификации ICCD создает  $G = G_1 \cdot G_2$  вторичных электронов в матрице ПЗС. Здесь:

$G_1 = \langle G_1 \rangle$  – среднее электронное усиление ЭОПа, сочлененного с ПЗС ( $G_1 \sim 10^4$ );  
 $G_2 = \langle G_2 \rangle$  – среднее электронное усиление в ПЗС ( $G_2 \sim 1$ ).

Максимальная емкость потенциальной ямы в ПЗС около  $20000e^-$ . Для ICCD с ЭОПом 2-го поколения максимальное среднее число первичных фотоэлектронов при  $G \sim 10^4$  не должно превышать  $20000/10000 = 2e^-$  для ICCD, что значительно меньше пуассоновского предела. При этом режим работы телеподсмотров необходимо устанавливать (через изменение высокого напряжения на ЭОПе) таким образом, чтобы избежать насыщения ПЗС вторичными электронами. Поскольку величина электронного усиления  $G$  задается наблюдателем через изменение напряжения на ЭОПе, всегда можно подобрать режим работы ТВП без насыщения ПЗС.

#### Фотонный шум

При пуассоновской статистике (19) наиболее вероятно средняя величина сигнала  $\langle n_m \rangle$ , около которого шум флуктуирует с дисперсией

$$\text{var}(n_m) = \langle n_m \rangle = \sigma_m^2, \quad (21)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое значение флуктуаций. В этом случае отношение сигнал/шум

$$S/N = \langle n_m \rangle / \sqrt{\text{var}(n_m)} = \frac{\langle n_m \rangle}{\sqrt{\langle n_m \rangle}} = \sqrt{\langle n_m \rangle} = \sigma_m. \quad (22)$$

Подставив (22) в (20), получим

$$\sigma_m = \sqrt{10^{-0.4m} \cdot \alpha \eta \cdot I_0 \cdot \Delta \lambda A T D^2 / d^2}. \quad (23)$$

Задав типичные значения исходных параметров в наблюдении с ТВП на БТА:  $\alpha = 0.05$ ,  $\eta = 0.5$ ,  $\Delta \lambda = 3 \cdot 10^3 \text{ \AA}$ ,  $\theta = 2''$ ,  $d = 0.24$  мм,  $T = 0.02$  с,



$AT \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2 \cdot \text{с}$ , выражение (23) преобразуем к виду

$$\sigma_m \approx 3 \cdot 10^{-m/5} \cdot 10^3 e^- \quad (24)$$

Таким образом, численные оценки для телеподсмотров ИССД-модификации в первичном фокусе БТА будут следующими:

для  $m = 15$  получим  $\sigma_{15} \approx 3e^-$  и  $\langle n_{15} \rangle \approx 9e^-$ ,  
для  $m = 20$  получим  $\sigma_{20} \approx 0.3e^-$ ,  $\langle n_{20} \rangle \approx 0.1e^-$ .

Выражение (22) показывает, что для распознавания слабоконтрастных деталей в изображении необходимо обеспечивать максимальное значение  $\langle n_m \rangle$  для того, чтобы отношение сигнал/шум было максимальным. Для изображений на БТА со средним качеством ( $\theta = 2''$ ):

для  $m = 15$   $(S/N)_{15} \approx 3$ ,

а при  $m = 20$   $(S/N)_{20} \approx 0.3$ .

При высоком качестве изображений ( $\theta = 1''$ ):

для  $m = 15$   $(S/N)_{15} \approx 6$ ,

а при  $m = 20$   $(S/N)_{20} \approx 0.6$ .

В таком режиме работы телеподсмотра на экране ВКУ наблюдается фотонный шум в виде отдельных вспышек (событий), рассеянных по изображению звезды вместе с такими же вспышками из-за фона неба и термоэлектронной эмиссии первого фотокатода ТВП. Поэтому приведенные оценки  $(S/N)_m$  являются максимальными, достигаются в отсутствие других шумов и присущи только идеальному фотодетектированию. Любой аддитивный шум снижает отношение  $S/N$  в зависимости от его интенсивности.

*Фон неба и термоэлектронный шум фотокатода*

#### Шум от фона неба

Среднее число первичных фотоэлектронов от фона неба, попадающих на 1 пиксель площадью  $A$  за время накопления изображения  $T$ , равно (Чуриловский, 1966):

$$\langle n_s \rangle = \eta S E_s A T = \eta S B H A T / e, \quad (25)$$

где  $E_s$  — освещенность фотокатода в лк;  $S$  — интегральная чувствительность фотокатода в видимой области спектра в мкА/лм (для фотокатода S-20  $S = 200$  мкА/лм);  $B \approx 2 \cdot 10^{-8}$  лм/стер/см<sup>2</sup> =  $2 \cdot 10^{-4}$  нит — средняя яркость безлунного неба;  $H = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2$  — светосила телескопа;  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона. После подстановки  $H$  в выражение (25) получим:

$$\langle n_s \rangle = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 S B A T / e \quad (26)$$

Дисперсия числа первичных фотоэлектронов в пикселе  $\text{var}(n_s) = \langle n_s \rangle$ , т.е. шум от фона неба  $\sigma_s = \sqrt{\langle n_s \rangle}$ .

Для наблюдений в первичном фокусе БТА ( $B = 2 \cdot 10^{-4}$  нит,  $S = 200$  мкА/лм) получаем следующие оценки:

$$\langle n_s \rangle \approx 0.1e^-, \quad \sigma_s \approx 0.3e^-.$$

При изображениях высокого качества ( $\theta = 1'' = 5 \cdot 10^{-6}$  рад)  $\langle n_s \rangle$  соответствует  $m_s \sim 21^m$  /кв.угл.с.

#### Шум термоэлектронной эмиссии

Для фотокатода S-20 при  $t = 10^\circ\text{C}$  термоток первичного фотокатода составляет около  $1000 e^- \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . При объеме выборки  $AT = 2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2 \cdot \text{с}$  получим величину шума термоэлектронной эмиссии:

$$\langle n_t \rangle \approx 2 \cdot 10^{-4} e^-, \quad \sigma_t \approx 1.4 \cdot 10^{-2} e^-.$$

#### Шум считывания в ПЗС

Для серийных ПЗС-телекамер с видеоусилителем с двойной коррелированной выборкой изготовитель указывает шум считывания в ПЗС  $\sigma \sim 50e^-$ , отнесенный к одному пикселю. Соответствующий эквивалентный шум первичных фотоэлектронов будет определяться как

$$\sigma_r \approx \sigma / G \approx 5 \cdot 10^{-3} e^-.$$

#### Шум квантования в устройствах оцифровки

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) создает дополнительный шум квантования. Для телеподсмотров ИССД-модификации максимальная емкость пикселя  $\approx 2.5 \cdot 10^4 e^-$ . Используя широко распространенный для оцифровки черно-белых видеосигналов 8-разрядный АЦП, оценим величину для интервала квантования  $q = C/256 \approx 10^2 e^-$ .

Квантование в АЦП с линейной шкалой приводит к возникновению шума квантования  $\sigma_k \approx q/\sqrt{12}$  (Гоноровский, 1977). Тогда шум квантования, отнесенный к фотокатоду, составит  $\sigma_k \approx (q/\sqrt{12})/G \approx 3 \cdot 10^{-3} e^-$ . Таким образом, пять шумовых составляющих в наших условиях имеют следующие значения:

Фотонный шум	$\sigma_m \approx 3 \cdot 10^{-m/5} \cdot 10^3 e^-$ $\langle n_m \rangle \approx 9 \cdot 10^{-0.4m} \cdot 10^6 e^-$
Шум от фона неба	$\sigma_s \approx 0.3e^-$ $\langle n_s \rangle \approx 0.1e^-$
Темновой шум фотокатода	$\sigma_t \approx 1.4 \cdot 10^{-2} e^-$ $\langle n_t \rangle \approx 2 \cdot 10^{-4} e^-$
Шум видеоусилителя	$\sigma_r \approx 5 \cdot 10^{-3} e^-$
Шум квантования	$\sigma_k \approx 3 \cdot 10^{-3} e^-$

Суммарный шум включает все пять шумовых составляющих и определяется выражением

$$\sigma = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_s^2 + \sigma_t^2 + \sigma_r^2 + \sigma_k^2}, \quad (27)$$

а отношение сигнал/шум

$$S/N = \langle n_m \rangle / \sigma, \quad (28)$$

что с учетом  $\langle n_m \rangle = \sigma_m^2$  дает отношение сигнал/шум

$$S/N = \frac{\sqrt{\langle n_m \rangle}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_k}{\sigma_m}\right)^2}}. \quad (29)$$

Продолжая делать численные оценки для телеподсмотров ICCD-модификации в первичном фокусе БТА, для  $m = 15$  и  $\sigma_{15} \sim 3e^-$  получим

$$\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_k}{\sigma_m}\right)^2 \ll 1,$$

поэтому для суммарного шума отношение

$$(S/N)_{15} \approx \sqrt{\langle n_{15} \rangle} \approx 3.$$

Таким образом, если относительные флуктуации, определяющие точность измерения  $1/(S/N)_{15}$ , составляют около 33%, то в изображении ярких звезд с  $m < 15$  доминирует фотонный шум.

Из (27) определим минимальный сигнал  $\langle n_{min} \rangle$ , который можно обнаружить на фоне суммарного шума  $\sigma$ , если предположить, что сигнал очень мал, а его фотонный шум  $\sigma_m$  много меньше остальных шумов. В этом случае

$$\sigma = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_t^2 + \sigma_r^2 + \sigma_k^2} \approx 0.37e^-.$$

Коэффициент определенности  $k$  для обнаружения предельно слабого изображения звезды на фоне неба равен 5 (Баум, 1967). Это означает, что условие

$$\langle n_{min} \rangle = 5 \cdot \sigma \approx 5 \cdot 0.37e^- \approx 1.85e^-$$

с учетом (20) определяет предельную звездную величину, наблюдаемую с помощью телевизионного подсмотра. Для различных значений качества изображения оценки предельной звездной величины для телеподсмотров ICCD-модификации в первичном фокусе БТА составят:

$m_{lim} \approx 16.9$  – для средних условий наблюдения ( $\theta \approx 2''$ );

$m_{lim} \approx 18.4$  – для отличных условий наблюдения ( $\theta \approx 1''$ ).

Чтобы получить большее отношение  $S/N$  для более слабых звезд ( $m > 15$ ), требуется либо усреднение по большому числу кадров  $K$ , либо необходимо увеличивать время накопления в фотоприемнике, используя накопительные свойства ПЗС-матриц.

#### 4. Статистические оценки фундаментальных ограничений на применение типовых ПЗС в составе телеподсмотров БТА и Цейсс-1000

##### Накопление в ПЗС

Усреднение в цифровой памяти  $K$  кадров дает выигрыш в величине  $S/N$  в  $\sqrt{K}$  раз, т.к. вместе с линейно суммируемым сигналом одновременно, по закону  $\sqrt{K}$ , суммируются все шумы. Если организовать докоммутационное накопление сигнала в ПЗС-камере, то при считывании накопленного изображения за время  $KT_K$  шум прибавится только один раз. Поэтому выигрыш в величине  $S/N$  будет равен не  $\sqrt{K}$ , а  $\alpha \cdot K > \sqrt{K}$ , где  $\alpha \approx 0.5 - 0.8$  с учетом накопления аддитивных шумов. Однако длительному накоплению в ПЗС препятствует темновой ток в матрице, который сильно зависит от температуры.

Средний темновой ток для ПЗС-матриц Exview HAD CCD (SONY Inc.), которые применяются в телеподсмотрах ICCD-модификации, зависит от температуры:

$$q_t = q_{293} \cdot 122 \cdot \exp(-6400/t), \quad (30)$$

где  $t$  — температура в градусах Кельвина, а  $q_{293} \approx 5 \cdot 10^3 e^-/c/\text{пиксел}$  для  $t = 293 \text{ K}$ .

Для неохлаждаемой ПЗС-матрицы в телеподсмотрах модификации ICCD максимальный темновой ток при  $t = 10^\circ\text{C}$  (средняя температура ПЗС в летний период в окрестностях БТА)  $q_{283} \approx 2000 e^-/c/\text{пиксел}$ .

Для получения одного поля (кадра) в ПЗС-камере с чересстрочной разверткой (50 полей в секунду) время экспозиции без накопления составляет  $T = T_K = 0.02 \text{ с}$ , что соответствует  $40e^-/\text{пиксел}$  с шумом  $\sigma \approx \sqrt{40} \approx 6.3 e^-$  или  $\sigma/G \approx 6.3 \cdot 10^{-4} e^-$  на фотокатоде ТВП.

Таким образом, темновой ток в неохлаждаемой ПЗС при стандартной телевизионной развертке не дает существенного вклада в общий шум ТВП. Однако при накоплении в ПЗС при тех же условиях за время  $T = 2/3 \text{ с}$  ( $T = 32T_K$ ) накопленный заряд составит  $2000 \cdot 2/3 \approx 1300 e^-/\text{пиксел}$  с шумом  $\sqrt{1300} \approx 36 e^-$ , что сравнимо с шумом считывания  $50 e^-$ .

При накоплении заряда в ПЗС до максимальной емкости около  $20000 e^-/\text{пиксел}$  величина  $1300 e^-/\text{пиксел}$  составит около 6.5% от общего заряда, что снизит динамический диапазон ПЗС от 400:1 до 360:1, если не вычитать темновой ток ПЗС. Из этих оценок также видно, что в неохлаждаемой ПЗС за время накопления  $T \approx 20000/2000 = 10 \text{ с}$  емкость пикселя будет полностью исчерпана за счет темнового тока ПЗС.

Выигрыш в проникающей способности телеподсмотров типа ICCD с неохлаждаемой ПЗС-матрицей при большом времени накопления ( $T = KT_K$ ) по сравнению с ICCD со стандартной ТВ-разверткой можно оценить при одном и том же значении  $S/N$ , т.е.

$$(S/N)_{m1} = (S/N)_{m2}.$$

Воспользовавшись (29), имеем

$$\begin{aligned} (S/N)_{m1} &= \sqrt{\langle n_{m1} \rangle} \approx \sqrt{T_K}, \\ (S/N)_{m2} &= \sqrt{\langle n_{m2} \rangle} \approx \sqrt{KT_K}, \\ \frac{(S/N)_{m1}}{(S/N)_{m2}} &\approx \sqrt{K} \approx 10^{-0.4\Delta m}. \end{aligned}$$

Задавая время накопления на ПЗС-матрице  $T = 2/3 c$  ( $T = 32T_K$ ,  $K = 32$ ), получим выигрыш  $\Delta m = m_1 - m_2 = 1.9$ . Эта величина экспериментально подтверждена в наблюдениях на Цейсс-1000 (Fomenko et al., 2003).

Шум от фона неба в первичном фокусе Цейсс-1000 оценим по (26), приняв значения  $T = 32T_K$ ,  $f = 12$  м,  $AT \approx 0.8 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2 \cdot \text{с}$ ,  $B \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ лм/стер.}/\text{см}^2$ ,  $S = 2 \cdot 10^{-4} \text{ А/лм}$ . Тогда получаем

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\pi}{4} \eta \left(\frac{D}{f}\right)^2 \frac{SBAT}{e}} \approx 0.5e^-,$$

т.е.

$$\sigma_s^2 \gg \sigma_m^2 + \sigma_r^2 + \sigma_t^2 + \sigma_k^2.$$

Условие обнаружения минимального сигнала  $\langle n_m \rangle = 5\sigma \approx 2.5e^-$  дает нам возможность оценить предельную звездную величину для накопительных телеподсмотров ICCD-модификации в первичном фокусе Цейсс-1000. При средних условиях наблюдений ( $\theta = 2''$ ,  $d \approx 0.12$  мм) получаем для Цейсс-1000:  $m_{lim} \sim 17.5$  для накопительной ICCD (при времени накопления на ПЗС  $T = 32T_K = 2/3 c$ ).

В первичном фокусе БТА при тех же условиях ( $T = 2/3 c$ ) накопительная ICCD может обеспечить предел:

$$\begin{aligned} m_{lim} &\sim 18.3 \quad (\theta = 2''), \\ m_{lim} &\sim 19.8 \quad (\theta = 1''). \end{aligned}$$

## Разрешение

При наблюдении звезд на больших оптических телескопах с помощью телевизионных подсмотров важно знать, как соотносится средний диаметр звезды  $d$  (рис.3) на фотокатоде с размером пикселя  $p$ , т.к. от величины  $d/p$  зависит характер фотодетектирования. Если диаметр звезды меньше

размера пикселя ( $d < p$ ), то разрешение ограничивает телеподсмотр. Если  $d > p$ , то разрешение ограничивает система «атмосфера + телескоп».

Для большинства ПЗС-матриц  $p = (x \approx y)$ . Средний размер пикселя на фотокатоде ЭОПа в ICCD  $x \approx 32$  мкм,  $y \approx 26$  мкм при размере пикселя в ПЗС-матрице  $x \approx 6.5$  мкм,  $y \approx 6.3$  мкм. При наилучших изображениях  $\theta \approx 1''$  минимальный диаметр звезды на Цейсс-1000 составляет около 60 мкм, в ПФ БТА — около 120 мкм. Во вторичных фокусах БТА минимальный диаметр составляет около 900 мкм. Таким образом, практически все наблюдения звезд с помощью ТВП для БТА и Цейсс-1000 ведутся в режиме ограничения разрешения оптикой телескопа и атмосферой.

Для больших оптических телескопов при выполнении условий:

$T \gg \tau_c$ ,  $A \gg A_c$ ,  $N_T > 1$ ,  $N_A \gg 1$ ,  $D/r_0 \gg 1$  общее разрешение системы «телеподсмотр + телескоп + атмосфера» определяют  $R_1$  и  $R_2$ , где

$R_1 = \lambda f/r_0$  — средний размер изображения звезды на фотокатоде ТВП,

$R_2 = p$  — размер пикселя в ТВП. Общее разрешение  $R$  моделируется выражением (Holst, 1999):

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2} = R_2 \sqrt{1 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2}. \quad (31)$$

Подставив  $R_1$  и  $R_2$  в (31), получим

$$R = p \sqrt{1 + \frac{\lambda^2 f^2}{r_0^2 p^2}}. \quad (32)$$

Приняв в качестве параметров  $p = 50, 100, 200$  мкм,  $\lambda = 0.5$  мкм,  $f = 6, 12, 24, 180$  м,  $r_0 = 5, 10$  см, построим графики изменения  $R$  как функции от  $f$  (рис. 4).

По рис. 4 и формуле (32) можно заключить, что при  $p = \lambda f/r_0 = d$  величина  $R = p\sqrt{2}$ , т.е. если размер пикселя равен среднему диаметру звезды в изображении, разрешение ухудшается в  $\sqrt{2}$  раз. Оптимальное согласование телевизионного подсмотра с системой «атмосфера + телескоп» реализуется тогда, когда размер пикселя превосходит размер изображения звезды в 1.5 – 2 раза.

## Динамический диапазон

Особенность работы телеподсмотров на больших оптических телескопах состоит в том, что на фотоприемнике наблюдаются одиночные точечные объекты, занимающие площадь от 10 до 500 пикселей. Кроме того, ТВП работают в линейном режиме, при котором нет автоматического ограничения выходного сигнала при увеличении яркости наблюдаемого объекта. Главными параметрами, определяющими реальный динамический диапазон ТВП,

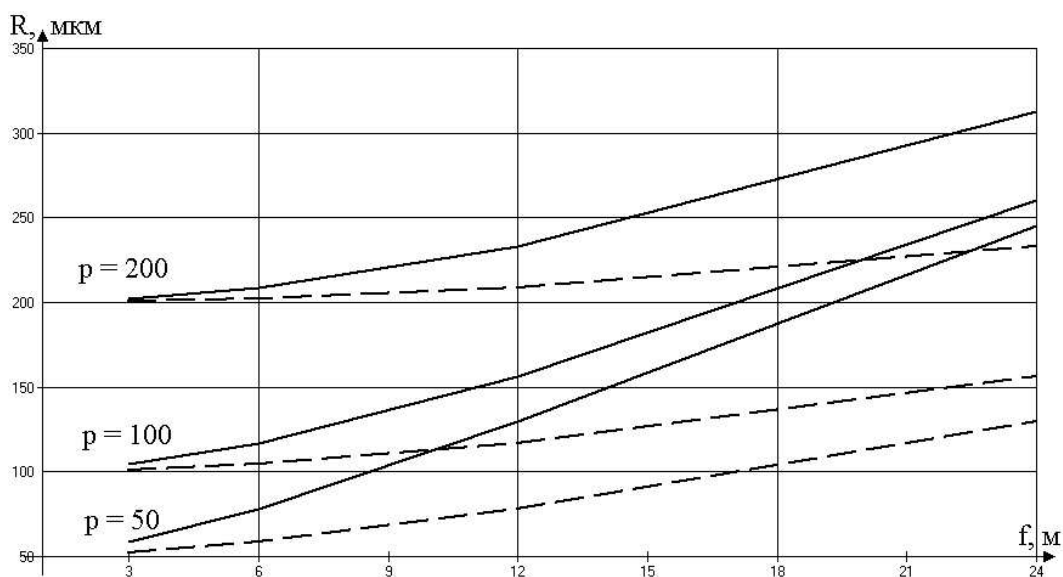


Рис. 4: Зависимость общего разрешения  $R$  системы «телеподсмотр+телескоп+ атмосфера» от фокусного расстояния  $f$  при разных размерах пиксела ( $p$ ) и параметрах Фрида ( $r_0$ ). Сплошные кривые соответствуют  $r_0 = 5$  см, штриховые кривые  $r_0 = 10$  см.

являются общее электронное усиление  $G$  и емкость пикселя  $C$ .

Следует различать два динамических диапазона в ТВП:

- общий — для интервала наблюдаемого светового потока (интервал звездных величин  $\Delta m$ ), который определяется регулируемым вручную электронным усилением  $G$ ;
- диапазон, характеризующий наблюдаемый интервал звездных величин  $\Delta m$  при фиксированном  $G$  в одном телевизионном поле.

Оценки двух динамических диапазонов выполним для телеподсмотров модификации ICSSD с непрерывной разверткой ( $T = T_K$ ) в первичном фокусе БТА. Сначала рассмотрим вариант работы ЭОПа при минимальном электронно-оптическом усилении  $G_{min}$ .

Для емкости канала, близкого к насыщению,  $C \approx 20000e^-$ , и при минимальном усилении ЭОПа  $G_{min} \approx 10$  граница динамического диапазона для ярких звезд составит  $\langle n_m \rangle = C/G_{min} = 9 \cdot 10^6 \cdot 10^{-0.4m}$ , откуда  $m_{max} \approx 9$ .

Предельная звездная величина найдена ранее:  $m_{min} \approx 17$ , таким образом, общий динамический диапазон  $\Delta m$  составляет 8 звездных величин.

Оценим динамический диапазон на границе ярких звезд в одном телевизионном поле. Так как при наблюдении ярких звезд преобладают фотонный шум и шум считывания ПЗС, то (29) преоб-

разуется к виду

$$S/N = \frac{\langle n_m \rangle}{\sqrt{\langle n_m \rangle + \sigma_r^2}}, \quad (33)$$

откуда

$$\langle n_m \rangle = \frac{1}{2}(S/N)^2 = [1 + \sqrt{1 + 4\sigma_r^2/(S/N)^2}]. \quad (34)$$

При уверенном обнаружении в телевизионном поле слабой звезды с отношением  $S/N = 10$  ( $\sigma_r \sim 50e^-$ ) из (34) получим

$$\langle n_m \rangle \approx 550e^- = 9 \cdot 10^6 \cdot 10^{-0.4m},$$

откуда  $m_{min} \approx 10.5$  зв.величины. Таким образом, динамический диапазон в одном поле  $\Delta m \approx 1.5$  зв.величины.

Рассмотрим вариант работы ЭОПа при максимальном электронно-оптическом усилении  $G_{max}$ . В этом случае изображение на границе слабых звезд с  $m_{lim} \approx 17$  дает на его фотокатоде  $\langle n_{17} \rangle \approx 2e^-$  при общем шуме

$$\sigma \approx \sqrt{(2 + 0.37)} \approx 1.54e^-.$$

Следовательно, для таких звезд точность обнаружения составит  $(S/N)_{17} \approx 1.2$ . На экране ВКУ изображение предельных звезд с  $m_{lim} \approx 17$  формируется двумя-тремя событиями со средней амплитудой  $\sim 10000e^-$ . Поэтому звезды слабее  $17^m$  практически не будут наблюдаться.

При обработке видеоизображений усреднение  $K$  кадров дает выигрыш  $\sqrt{K}$  в точности обнаружения звезды. Так, при  $K = 256$  отношение  $S/N$

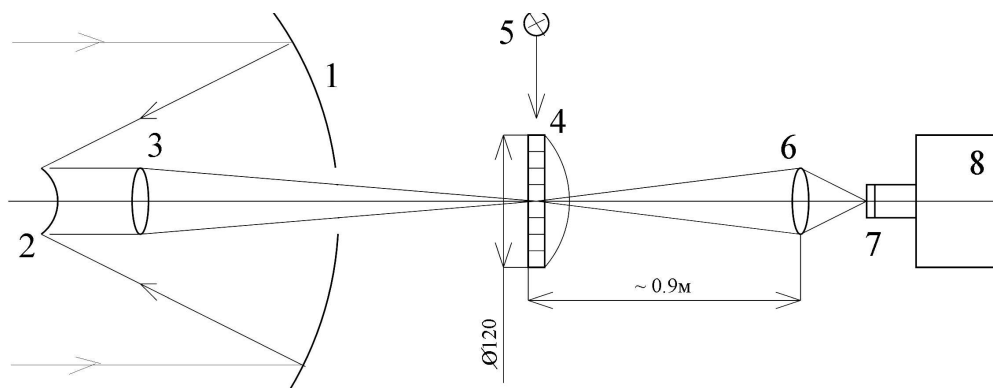


Рис. 5: Оптическая схема телегида БТА: 1 – главное зеркало, 2 – гиперболическое зеркало, 3 – компенсатор, 4 – фокальная плоскость с масштабной сеткой, 5 – стекловолоконная подсветка масштабной сетки, 6 – CCTV-объектив, 7 – ПЗС-матрица, 8 – ПЗС-камера.

увеличится в  $\sqrt{256} = 16$  раз, таким образом, точность обнаружения предельных звезд с  $m_{\text{lim}} \approx 17$  составит  $(S/N)_{17/256} \approx 19$ .

В этом случае в одном поле могут наблюдаться уже в 10 раз более слабые звезды ( $\Delta m = 2.5$ ) и  $m_{\text{lim}} \approx 19.5$  с точностью  $(S/N)_{19.5/256} \approx 0.2\sqrt{2+0.37} \cdot 16 \approx 4.2$ .

Таким образом, общий динамический диапазон ТВП возрастет до  $\Delta m \sim 10$  зв. величин (10000:1).

Очевидно, что это достигнуто путем управления такими параметрами телеподсмотров, как электронное усиление  $G$  и время усреднения  $KT_K$ .

## 5. Разработка новых телеподсмотров для БТА и Цейсс-1000

### Телегид БТА

Для БТА разработан новый телевизионный подсмотр с серийной ПЗС-камерой, который установлен на гиде БТА (Фоменко и др., 2004). Гид БТА — это 70-см телескоп, жестко закрепленный на штатге 6-м телескопа. При масштабе  $18''/\text{мм}$  в фокальной плоскости телескопа его фокусное расстояние составляет 11.3 м (Бужинский и др., 1976). Оптическая схема телегида БТА (гид БТА с новым телевизионным подсмотром) приведена на рис. 5.

Изменяя расстояние между объективом 6 и масштабной сеткой 4, одновременно сфокусировав изображение на ПЗС-матрице 7, можно установить заданный размер поля зрения телегида.

Объектив 6 с фокусным расстоянием 75 мм и относительным отверстием  $1/1.4$  уменьшает изображение масштабной сетки 4 примерно в 10 раз и формирует на фоточувствительной поверхности ПЗС звездное поле размером порядка  $14.5' \times 10.8'$ . Это соответствует эквивалентному фокусу телегида  $\approx 1.13$  м.

ПЗС-камера разработана на базе модуля серийной ТВ ПЗС-камеры VNI-743 (ЗАО «ЭВС», С-Петербург) с ПЗС-матрицей  $1/3''$  ICX-259AL (SONY) размером  $(4.8 \times 3.6)$  мм с числом пикселей  $752 \times 582$  и с размером пикселя  $(6.4 \times 3.6)$  мкм.

В САО ПЗС-матрица была оборудована термоэлектрическим Пельтье-холодильником, что позволило охлаждать матрицу на  $40\text{--}50^\circ\text{C}$  ниже окружающей температуры.

Разработано специализированное программное обеспечение с целью получения компьютерного доступа к ПЗС-камере VNI-743 для дистанционного управления ее параметрами. Телегид БТА сконструирован без ЭОПа, поэтому прост и надежен в эксплуатации. Данный телеподсмотр имеет большой динамический диапазон для обеспечения наблюдений как в безлунное время, так и в полнолуние. Позволяет уверенно отождествлять объекты до  $18^m$ . Компьютерное управление в операционной среде Linux (Шергин и Максимова, 2000) позволяет использовать телегид в качестве сетевого прибора с доступом к его видеоизображениям с любого компьютера как в локальной сети САО, так и через Интернет.

### ICCD-телеподсмотр UAGS для Цейсс-1000

Основной причиной перехода на ПЗС-приемники в телеподсмотрах БТА и Цейсс-1000 является сложность конструкций, большие габариты и вес видиконных устройств. В САО с 1997 г. разработано несколько ICCD-систем с оптическим перебросом (Komarov et al., 2002a), которые работают в стандартном телевизионном режиме (625 строк, 25 кадров/с). В последнее время отечественной промышленностью начат мелко-серийный выпуск телевизионных камер с высокочувствительными ПЗС-матрицами массового производства. Главное

отличие новых телесистем — способность накапливать изображения на ПЗС-матрице с длительностью экспозиций более 40 мсек при стандартной телевизионной развертке и, кроме того, автоматическое или компьютерное дистанционное управление параметрами ПЗС-камер для получения оптимального изображения поля исследуемого источника.

В САО нами разработан телевизионный подсмотр модификации ICCD для телескопа Цейсс-1000 (Fomenko et al., 2003), в котором время накопления на ПЗС-матрице автоматически увеличивалось до 2/3 секунды при минимальной освещенности ПЗС-матрицы. Сравнительный анализ результатов обработки полей стандартов показал, что в условиях наблюдений со средним качеством изображения (около 2'') проникающая способность с новым телевизионным подсмотром повысилась примерно на две звездные величины в видимой области спектра и достигла 17<sup>m</sup>5. Достигнутая предельная чувствительность подтверждает теоретические расчеты, проведенные для накопительных ICCD в первичном фокусе Цейсс-1000.

### Ограничения на телеподсмотр “панорамный обзор неба”

В САО нами разработана и введена в эксплуатацию телесистема “панорамный обзор ночного неба”, в которой установлена телекамера с возможностью накопления изображения в ПЗС до 2/3 с (Komafov et al., 2002b). Число фотоэлектронов в пикселе от звезды со зв. величиной  $m$ , определяемое выражением (20), можно записать в виде:

$$\langle n_m \rangle = \alpha \eta \cdot 10^{-0.4m} \cdot I_0 \cdot \Delta T \Delta \lambda [(\pi D^2/4)/(\pi d^2/4)]. \quad (35)$$

Изображение на ПЗС-камере 1/3'' с размером пикселя  $p \approx 7$  мкм формируется объективом  $f = 6$  мм, F1.2. Так как дифракционный размер изображения  $d = \lambda F \approx 0.6$  мкм, то даже с учетом аберрации объектива  $d \ll p$ . Следовательно,  $\pi d^2/4$  (в 35) можно заменить на площадь пикселя  $A$ , после чего (35) примет вид:

$$\langle n_m \rangle \approx \alpha \eta \cdot 10^{-0.4m} \cdot I_0 \cdot T \Delta \lambda (\pi D^2/4). \quad (36)$$

В телеподсмотре установлена высокочувствительная ПЗС-матрица Exview HAD (SONY Inc.), которая имеет максимум чувствительности в красной области при  $\lambda = 0.66$  мкм со средней квантовой эффективностью  $\approx 0.25$ . Оценим фон неба при наблюдении с данным телеподсмотром, используя (26). С учетом заданных коэффициентов  $F1/F2 = 4/1.2$ ,  $A2/A1 = 4 \cdot 10^{-2}$ ,  $T2/T1 = 32$ ,  $\Delta \lambda_2/\Delta \lambda_1 \approx 2$  получим  $\langle n_r \rangle \approx 4e^-$ ,  $\sigma_r \approx 2e^-$ .

Максимальный темновой ток ПЗС при температуре окружающей среды  $t = 283$  К и времени накопления на ПЗС-матрице  $T = 2/3$  с определяет величины (см. гл.4)

$$\langle n_{283} \rangle \approx 1300e^-/\text{пиксел}/с, \quad \sigma_{283} \approx 36e^-,$$

что сравнимо с шумом считывания  $\sigma_{ш} \approx 50e^-$ . Используя (36) и приведенные выше численные оценки, получим

$$\langle n_m \rangle \sim 10^5 \cdot 10^{-0.4m}. \quad (37)$$

Выражение (37) позволяет оценить ограничения, накладываемые на точность обнаружения объектов заданной звездной величины в панорамном обзоре неба:

$$\begin{aligned} \langle n_{2.5} \rangle &\sim 10^4 e^-, & \sigma_{2.5} &\approx 100e^-, & (S/N)_{2.5} &\approx 85; \\ \langle n_5 \rangle &\sim 10^3 e^-, & \sigma_5 &\approx 32e^-, & (S/N)_5 &\approx 14; \\ \langle n_{7.5} \rangle &\sim 10^2 e^-, & \sigma_{7.5} &\approx 10e^-, & (S/N)_{7.5} &\approx 1.6; \\ \langle n_{10} \rangle &\sim 10e^-, & \sigma_{10} &\approx 3.2e^-, & (S/N)_{10} &\approx 0.16. \end{aligned}$$

Программное обеспечение панорамного обзора неба позволяет получать цифровые видеоизображения с телеподсмotra с усреднением до  $K = 256$  кадров. В этом случае полученные выше оценки для отношения  $S/N$  необходимо умножить на величину  $\sqrt{K} = 16$ , т.е.:

$$(S/N)_{2.5} \approx 1360, \quad (S/N)_5 \approx 224,$$

$$(S/N)_{7.5} \approx 26, \quad (S/N)_{10} \approx 2.6.$$

Таким образом, предельная проникающая способность обзора неба увеличивается до  $m_{lim} \lesssim 10$ , что подтверждается наблюдениями в ясную безлунную ночь.

### Выводы

1. Проведенный статистический анализ параметров телеподсмotra больших оптических телескопов САО РАН (БТА и Цейсс-1000) в рамках принятых приближений определил ограничения, накладываемые на телевизионные наблюдения неба сквозь турбулентную атмосферу.

2. Действие основных ограничивающих факторов ТВ-подсмotra, таких как узкий динамический диапазон и низкое отношение сигнал/шум при наблюдениях слабых объектов, можно значительно ослабить, если применять ПЗС-приемники изображений с большим размером пикселя (с большой электронной емкостью ПЗС), одновременно снижая темновой ток (охлаждение ПЗС) и увеличивая длительность экспозиции (накопление на ПЗС).

3. Применение вышеперечисленных в п.2 приемов позволяет использовать в подсмотровых системах больших оптических телескопов выпускаемые в настоящее время серийные высокочувствительные ПЗС массового производства, которые в режиме охлаждения и при длительном накоплении способны достичь предельной чувствительности.

4. В САО РАН были разработаны и внедрены в штатную эксплуатацию телеподсмотры с реализацией вышеперечисленных приемов. Исследования, проведенные на Цейсс-1000, показали, что увеличение длительности накопления на ПЗС до 2/3 секунды приводит к повышению проникающей способности телеподсмотров на 1.5–2 зв. величины, в зависимости от качества изображений, и достигает 17.5 звездной величины в видимой области спектра. Определенная в наблюдениях данная предельная чувствительность хорошо согласуется с теоретическими расчетами для накопительных ICCD в первичном фокусе Цейсс-1000.

### Список литературы

- Бакут П.А., Ряхин А.Д., Свиридов К.Н., Устинов Н.Д., 1986, Радиофизика, Изв.ВУЗов, **24**, 274
- Баум У.А., 1967, В кн.: Методы астрономии, М., с.9
- Бужинский И.М., Еникеев Д.Х. Зверев В.А. и др., 1976, Создание Большого азимутального телескопа БТА. М., ЦНИИ информации
- Гоноровский И.С., 1977, Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио
- Комаров В.В., Витковский В.В., Власюк В.В., Фоменко А.Ф., Шергин В.С., 2002, Препринт САО N150Т
- Рытов С.Н., Кравцов Ю.А., Татарский В.И., 1978, Введение в статистическую радиофизику. М., Наука
- Татарский В.И., 1967, Распространение волн в турбулентной атмосфере. М., Наука
- Фоменко А.Ф., Комаров В.В., Шергин В.С., 2004, Отчет САО N298
- Чуриловский В.Н., 1966, Теория оптических систем, М., Машиностроение
- Шергин В.С., Максимова В., 2000, Алгоритм работы управляющего вычислительного комплекса БТА. [www.sao.ru/hq/vsher/manuals/bta\\_control/](http://www.sao.ru/hq/vsher/manuals/bta_control/)
- Fomenko A.F., Komarov V.V., Komarova V.N., Fomenko N.A., 2003, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **55**, 143
- Holst H.C., 1999, Photonics Spectra, p.144
- Komarov V.V., Vitkovskij V.V., Vlasyuk V.V., Fomenko A.F., Shergin V.S., 2002a, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **53**, 134
- Komarov V.V., Vitkovskij V.V., Fomenko A.F., Fomenko N.A., Shergin V.S., 2002b, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **54**, 134
- Mengers P., 1975, Analysis of factors affecting the performance of an I3TV system in detecting very faint stars. Quantex Corporation 4/74, USA
- Saleh B.E.A., 1978, Photoelectron statistics. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag