

УДК 520.16

В. Кузьков<sup>1</sup>, В. Андрук<sup>1</sup>, З. Содник<sup>2</sup>, Ю. Сизоненко<sup>1</sup>, С. Кузьков<sup>1</sup><sup>1</sup>Главная астрономическая обсерватория НАН Украины  
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27<sup>2</sup>ESTEC ESA, Postbus 229, 2200 AG Noordwijk, the Netherlands.

### Исследования корреляции дрожания изображений близких звезд в рамках лазерных коммуникационных экспериментов со спутником ARTEMIS

*Выполнено исследование корреляции дрожания изображений двух звезд, находящихся на малом угловом расстоянии, примерно соответствующем лазерным коммуникационным экспериментам с геостационарным спутником ARTEMIS. Анализировались ПЗС-изображения компонентов А и В двойной звезды  $\alpha$  Gem (расстояние  $4.8''$ ), полученные на Оптической наземной станции ESA на Канарских островах и на телескопе АЗТ-2 Главной астрономической обсерватории (Киев, Украина). Изображения получались каждую секунду с короткой экспозицией в узких фильтрах на длине волны около 850 нм. Получены значения средних фотометрических положений изображений компонентов А и В, их отклонений, а также коэффициент корреляции смещений двух изображений по координатам  $x$ ,  $y$ :  $K_x = 0.96$  и  $K_y = 0.95$ . Изучалась также дефокусировка изображений по ширине изображения звезды на половине максимальной интенсивности. Показано, что при лазерных коммуникационных экспериментах с геостационарным спутником ARTEMIS для компенсации атмосферной турбулентности можно использовать данные для направления на видимое положение геостационарного спутника.*

**ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕЛЯЦІЇ ДРИЖАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ БЛИЗЬКИХ ЗІРОК У РАМКАХ ЛАЗЕРНИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ІЗ СУПУТНИКОМ ARTEMIS**, Кузьков В., Андрук В., Содник З., Сизоненко Ю., Кузьков С. — Виконано дослідження кореляції дрижання зображень двох зірок, що перебувають на малій кутовій відстані, яка приблизно відповідає лазерним комунікаційним експериментам з геостационарним супутником ARTEMIS. Аналізувалися ПЗС-зображення компонентів А і В подвійної зірки  $\alpha$  Gem (кутова відстань  $4.8''$ ), отримані на Оптичній наземній станції ESA на Канарських островах та на телескопі АЗТ-2 Головної астрономічної обсерваторії (Київ, Україна). Зображення отримувалися щосекунди з короткою експозицією у вузьких фільтрах на довжині хвилі приблизно 850 нм. Отримано значення середніх фотометричних положень зображень компонентів А і В, їхніх відхилень, а також

коефіцієнт кореляції зміщень двох зображень по координатах  $x$ ,  $y$ :  $K_x = 0.96$  і  $K_y = 0.95$ . Вивчалось також дефокусування зображень по ширині зображення зірки на половині максимальної інтенсивності. Показано, что при лазерних комунікаційних експериментах з геостационарним супутником ARTEMIS для компенсації атмосферної турбулентності можна використовувати дані для напрямку на видиме положення геостационарного супутника.

*COMPARATIVE INVESTIGATIONS OF CORRELATION OF ATMOSPHERE TURBULENCE FOR LASER COMMUNICATION EXPERIMENTS WITH ARTEMIS SATELLITE, by Kuz'kov V., Andruk V., Sodnik Z., Sizonenko Yu., Kuz'kov S. — Comparative investigation of correlation of atmosphere turbulence on small angles which are equal to the laser communication experiments with the ARTEMIS satellite was performed. The lot of images of the double Castor star components was calculated according to results of the observations carried out at ESA's Optical Ground Station (OGS, Canary Islands) and at the AZT-2 telescope of the Main Astronomical Observatory (Kyiv, Ukraine). Short expositions of CCD cameras in thin filters on a wavelength of 850 nm were used. Calculations of middle photometric positions and fluctuations on  $x$ ,  $y$  coordinates of images of A and B components of the double star were performed. Besides, we estimated the correlation coefficient of A and B positions separated by 4.8 arc second ( $K_x = 0.96$  and  $K_y = 0.95$ ). Photometric and coordinate results and FWHM (Full Width Half Maximum) function were obtained using the MIDAS/ROMAFOT software package. It is shown that atmosphere turbulence data from direction on visible position of the satellite can be used for the compensation of atmosphere turbulence.*

#### ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с программой лазерных коммуникаций Европейское космическое агентство (ESA) разработало и запустило низкоорбитальный спутник SPOT-4 в 1998 г. и геостационарный спутник ARTEMIS в 2001 г. (21.5° в. д.) с лазерными коммуникационными терминалами на борту. С января 2003 г. между SPOT-4 и ARTEMIS регулярно проводятся сеансы связи с использованием лазерного коммуникационного канала. Также проводятся исследовательские эксперименты по лазерной связи через атмосферу между спутником ARTEMIS и Оптической наземной станцией ESA (далее OGS), расположенной на Канарских островах [2, 9].

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины (далее ГАО) разрабатывает приемно-передающую систему с целью проведения лазерных атмосферных и коммуникационных экспериментов со спутником ARTEMIS на базе касегреновского фокуса астрономического телескопа AZT-2 [1, 7].

Представляют интерес сравнительные исследования влияния атмосферы на распространение лазерного излучения между наземными телескопами и геостационарным спутником для OGS ESA (высота 2400 м, атлантический регион) и ГАО НАНУ (высота 190 м, континентальный регион).

В отличие от космических лазерных каналов связи между спутниками, лазерные каналы связи между наземными оптическими телескопами и геостационарным спутником подвержены влиянию атмосферной турбулентности, которая уменьшает эффективность лазерного канала связи.

Лазерные коммуникационные системы обладают преимуществами по скорости передачи, массе и габаритам по сравнению с радиоканалами связи на расстояниях, сравнимых с орбитами Луны и ближайших планет. В этих случаях необходимо использовать принимающую систему на основе большого земного телескопа или нескольких телескопов меньшего размера. Так, в

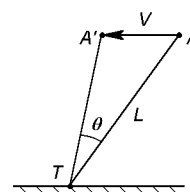
2009 г. NASA планирует запустить космический корабль к Марсу и провести лазерные коммуникационные эксперименты с Землей, используя 5-м Паломарский телескоп. Ожидаемая скорость передачи информации 1—30 Мб/с. К примеру, космический аппарат «Одиссей» имел скорость передачи информации по радиоканалу всего лишь около 120 кб/с [5].

#### СХЕМА ЛАЗЕРНЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Как правило, наземно-спутниковые системы лазерной связи используют устройства компенсации турбулентности атмосферы. В этих устройствах используются в простейшем случае быстро колеблющиеся зеркала с пьезоэлектрическим или электромагнитным приводом, а в более сложных случаях — адаптивные оптические системы с анализом и коррекцией приходящего волнового фронта.

Если лазерная связь осуществляется между наземной оптической станцией и геостационарным спутником, то появляется временная задержка  $t_d$  сигнала между полученным от спутника и дошедшим до спутника сигналами и угловое рассогласование  $\theta$  между видимым и реальным положением спутника (рис. 1).

Рис. 1. Схема задержки распространения лазерных сигналов и углового рассогласования положений



Временная задержка определяется из выражения  $t_d = 2L/c$ , где  $L$  — расстояние от наземной станции до спутника, движущегося с линейной скоростью  $V$ . В случае лазерных экспериментов со спутником ARTEMIS наклонная дальность  $L = 38000$  км и  $t_d = 0.253$  с. Угол  $\theta$  между видимым положением спутника и направлением посылаемого сигнала определяется выражением

$$\theta = 15'' \cdot \cos\delta, \quad (1)$$

где  $\delta$  — угол склонения положения спутника на небе. Координаты OGS ESA: долгота  $16.5101^\circ$  в. д., широта  $28.2995^\circ$  с. ш., высота над уровнем моря 2393 м, координаты ГАО НАНУ:  $30.4967^\circ$  в. д.,  $50.3642^\circ$  с. ш., 190 м. ARTEMIS — нестабильный геостационарный спутник (неудачный вывод на орбиту), и амплитуда его отклонения составляет около  $5^\circ$  от среднего положения при  $\delta = -7^\circ 17'$  для ГАО. В соответствии с выражением (1) угол  $\theta$  между направлениями получаемого и передаваемого лазерных сигналов изменяется между  $3.7''$  и  $3.8''$ . Для максимального отклонения  $\theta = 3.8''$  расстояние  $d_L$  между осями принимаемого и передаваемого лазерных лучей на орбите спутника определяется выражением

$$d_L = 2L \cdot \sin(\theta/2). \quad (2)$$

Для  $L = 38000$  км значение  $d_L = 700$  м. Незначительная ошибка в значении  $\theta$  существенна для уровня коммуникационного сигнала.

Аналогичная ситуация характерна для астрономических адаптивных систем компенсации турбулентности атмосферы, где используется искусственная звезда, зажигаемая лазерным излучением в верхней атмосфере. В этом случае свет от искусственной и наблюдаемой звезд также движется в

разных воздушных массах [4]. Для наших коммуникационных экспериментов и эффективной работы устройств компенсации турбулентности атмосферы важно провести исследования коррелятивных свойств атмосферной турбулентности на соответствующих углах  $\theta$  в разных атмосферных регионах.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Атмосфера в различной степени влияет на лазерное излучение при его распространении от наземной станции на спутник и в обратном направлении. При направлении лазерного луча с геостационарного спутника к земной поверхности атмосфера эффективно изменяет и рассеивает лазерный пучок только в последней фазе его пути. При протяженности турбулентной атмосферы около 50 км путь рассеивания составляет лишь последние 0.13 % всего пути распространения (38 000 км). Когда лазерный пучок движется от земной поверхности к спутнику, атмосфера рассеивает лазерный луч на первых этапах его распространения к спутнику. В этом случае влияние турбулентности атмосферы намного значительней. Диаметр лазерного луча при этом должен быть оптимизирован для конкретного места проведения коммуникационных экспериментов и определяется степенью турбулентности атмосферы.

Как известно, атмосферная турбулентность [8] есть результат движения воздушных масс. Она появляется, когда число Рейнольдса превышает свое критическое значение

$$Re = VL/\nu,$$

где  $V$  — скорость потока,  $\nu$  — кинематическая скорость,  $L$  — характерная длина, ограничивающая поток. Критическое значение  $Re$  составляет  $\sim 2000$ . Начиная с него ламинарный поток трансформируется в турбулентный. Для воздуха  $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ . Если  $V = 1 \text{ м/с}$ , то  $L = 3 \text{ см}$ .

Степень турбулентности атмосферы также определяется градиентом температуры. Влияние температурного градиента возрастает в приземных слоях атмосферы. В обычном случае влияние температурного градиента на атмосферу определяется структурной функцией  $D_T(\rho)$ :

$$D_T(\rho) = C_T^2 \rho^{2/3},$$

где  $C_T^2$  — структурная константа температурных флуктуаций,  $\rho$  — величина неоднородности.

При оптических наблюдениях движения атмосферного потока, флуктуации температуры и пары воды вызывают изменения коэффициента преломления атмосферы:

$$n = n_0(T, C_v) + ik(T, C_v),$$

где мнимая часть с коэффициентом  $k$  соответствует поглощению парами воды и является значимой величиной в инфракрасном диапазоне. Она определяется температурой  $T$  и концентрацией паров воды  $C_v$ . Для астрономических наблюдений и коммуникационных экспериментов концентрация  $C_v$  обычно низкая. Флуктуации действительной части  $\Delta n$  определяются выражением  $\Delta n = (\partial n_0 / \partial T) \Delta T$ . Структурная функция коэффициента преломления определяется выражением  $D_n(\rho) = C_n^2 \rho^{2/3}$ , где  $C_n^2$  — структурная константа преломления.

Структурная константа  $C_n^2$  связана с величиной  $C_T^2$  выражением

$$C_n^2 = [8 \cdot 10^{-5} P / T^2] C_T^2,$$

где давление  $P$  выражается в миллибарах, а температура — в кельвинах.

Величина  $C_n^2$  характеризует локальную интенсивность турбулентности. Интенсивность турбулентности повышается у земной поверхности, на высотах  $h \approx 5$  км и в тропопаузе ( $h = 10...15$  км). Есть возможность прямого измерения распределения  $C_n^2$  в атмосфере с высотой, используя баллонные методы исследований.

Для наземных наблюдений возможно не прямое вычисление среднего значения  $C_n^2$  путем проведения измерения корреляции мерцаний компонентов двойных звезд. Именно наблюдение компонентов двойных звезд наиболее подходит для исследования коррелятивных свойств турбулентной атмосферы и для наших лазерных коммуникационных экспериментов.

Ранее мы проводили сравнительные наблюдения различных одиночных звезд на разных воздушных массах для сравнительной оценки атмосферной неустойчивости на OGS и ГАО [6]. OGS ESA находится в лучшем положении, чем ГАО, так как расположена на высоте 2400 м, и инверсионный слой атмосферы лежит ниже самой обсерватории. К тому же турбулентность атмосферы уменьшается с высотой.

Для сравнительного исследования коррелятивных свойств турбулентной атмосферы мы использовали способ измерения корреляции движения и мерцания изображений наблюдаемой двойной звезды. Двойная звезда  $\alpha$  Gem (Кастор) наиболее удобна для наблюдений.

В каталоге HIPPARCOS звезда имеет координаты:  $\alpha = 7^h 34^m 35.75^s$ ,  $\delta = 31^h 53^m 16.87^s$  (2000), но компоненты не разделены. В каталоге [10] приведены данные для компонентов А и В Кастора ( $2.0''$ , А3 и  $2.9''$ , А8) с изменяющимся расстоянием между ними и максимальным расхождением в  $6.3''$ . В 1819 г. расстояние  $\rho$  между компонентами составляло  $4.5''$ , в 1992 г. —  $3.3''$ .

На OGS звезда наблюдалась 21/22 марта 2005 г. Использовался фокус кудэ 1-м телескопа ( $F = 11.1$  м). Было получено 50 ПЗС-изображений (использовалась Astro Cam 4202) с узкополосным фильтром ( $\lambda = 857.6$  нм,  $\Delta\lambda = 29.5$  нм), экспозицией 0.1 с и интервалами между экспозициями 1 с. Угловое возвышение звезды над горизонтом составляло около  $48^\circ$ , что близко к положению спутника.

Наблюдения этой же звезды в ГАО проводились 25/26 апреля 2006 г. Использовался 20-см гид телескопа АЗТ-2 ( $F = 2.5$  м). Было получено 40 ПЗС-изображений (камера Chipex Cam CPT-CDH70) с узкополосным фильтром ( $\lambda = 850$  нм,  $\Delta\lambda = 10$  нм), экспозицией 40 мс и интервалом между экспозициями 1 с. Также было получено несколько контрольных изображений в фокусе Кассегрена ( $F = 10.5$  м) телескопа с использованием цветной CMOS-камеры ( $3000 \times 2000$  пкл). Угловое возвышение звезды составляло  $29.8^\circ$ , что также близко к возвышению спутника над горизонтом.

Технические характеристики использованных ПЗС-камер и фильтров приведены в табл. 1.

Атмосферная турбулентность в первом приближении приводит к хаотическому движению изображения объекта в фокальной плоскости телескопа

Таблица 1. Технические данные использованных ПЗС-камер и фильтров

ПЗС-камера	Приемная матрица	Количество пикселей	Размер пикселя, мкм	FOV на пиксель	$\lambda \pm \Delta\lambda$ , нм
CPT-CDH70	Sony	795×596	8.6×8.3	0.72"×0.69"	850±10
VersArray 1300F	E2V CCD36-40	1340×1300	20×20	0.42"×0.42"	857.6±29.5

и его разфокусировке. Движение изображения в фокальной плоскости возникает из-за изменений угла проходящего волнового фронта. В общем случае происходит более сложное хаотическое искажение волнового фронта.

Если имеется корреляция атмосферной турбулентности на углах около  $4''$ , компоненты двойной звезды двигаются синхронно. Аналогично фокусировка (дефокусировка) света компонентов звезды в фокальной плоскости также характеризует атмосферную турбулентность.

Исследуя изображения двойной звезды с короткими экспозициями в фокальной плоскости телескопа, можно получить информацию об коррелятивных свойствах атмосферной турбулентности.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ**

Обработка ПЗС-изображений звезды  $\alpha$  Gem проводилась с использованием метода [6] в программном пакете MIDAS/ROMAFOT [4]. Получены положения  $X, Y$  фотометрических центров каждого изображения звезды, их среднее для  $N$  изображений, их отклонения от среднего  $\Delta X, \Delta Y$  и средние квадратичные отклонения  $\sigma_x, \sigma_y$ . Получены звездные величины  $m_i$ , средние звездные величины для  $N$ -изображений, отклонения  $\Delta m_i$  и стандартные отклонения  $\sigma_m$ . Чтобы оценить дефокусировку изображений звезд, мы измеряли ширину  $f_{1/2}$  профилей изображений звезд на половине макси-

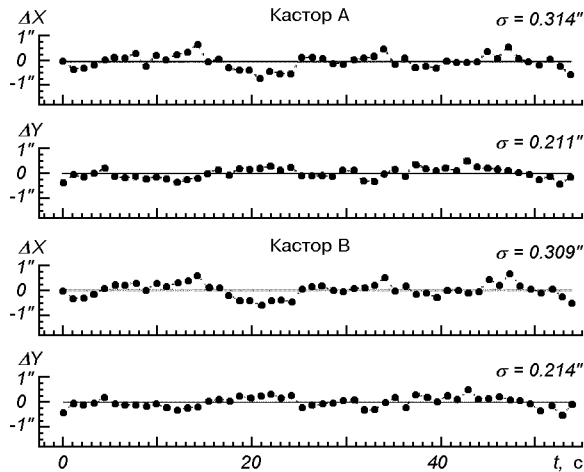


Рис. 2. Отклонения координат компонент А и В  $\alpha$  Gem от их среднего значения по наблюдениям на OGS

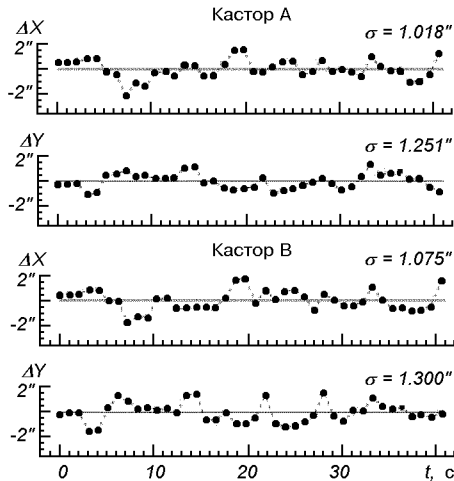


Рис. 3. То же по наблюдениям в ГАО

Рис. 4. Отклонения звездных величин и функции  $f_{1/2}$  компонентов А и В  $\alpha$  Gem по наблюдениям на OGS

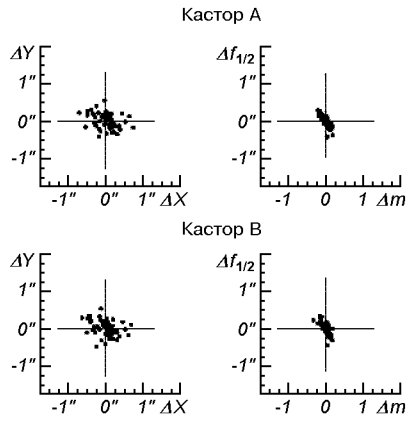
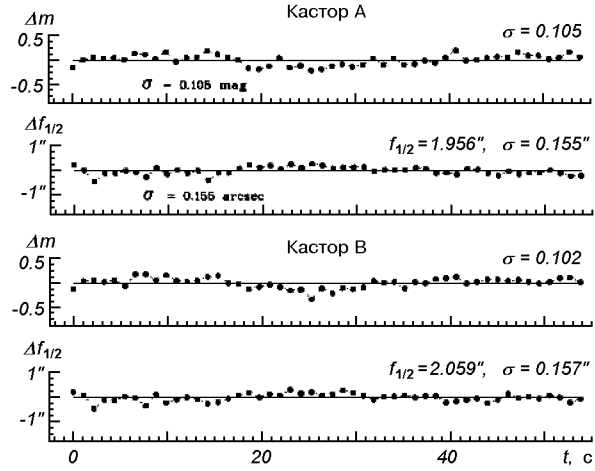


Рис. 5. Коррелятивные зависимости  $\Delta Y$  от  $\Delta X$ , а также  $\Delta f_{1/2}$  от  $\Delta m$  для каждого компонента  $\alpha$  Gem по наблюдениям на OGS

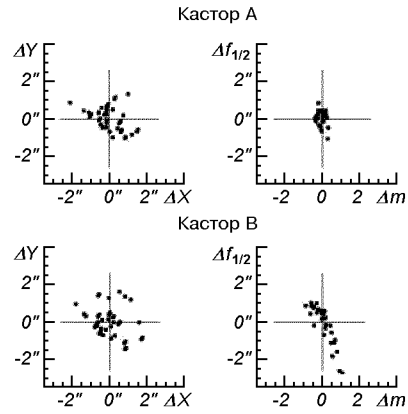


Рис. 6. То же по наблюдениям в ГАО

мальной интенсивности, их среднее, отклонение  $\Delta f_{1/2}$  от среднего и средние квадратичные отклонения  $\sigma_f$ . На рис. 2 и 3 приведены отклонения  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  координат компонентов А и В звезды  $\alpha$  Gem от их среднего положения, полученные соответственно на OGS ESA и в ГАО НАНУ. Видно полную корреляцию движения компонентов звезды по каждой координате.

Изменения  $\Delta m$  звездных величин и функции  $f_{1/2}$  во времени для компонентов А и В для OGS показаны на рис. 4. На диаграмме также видна существенная корреляция для компонентов А и В.

Коррелятивные зависимости  $\Delta Y$  от  $\Delta X$ , а также функции  $\Delta f_{1/2}$  от  $\Delta m$  для компонентов А и В, полученные на OGS и в ГАО соответственно, показаны на рис. 5 и 6. Как видно, во время наблюдения на OGS качество атмосферы было великолепным — отклонения положения компонентов А и В не превышают 0.3—0.4" от их среднего значения; заметна корреляция величин  $\Delta f_{1/2}$  и  $\Delta m$ . Качество атмосферы во время наблюдений в ГАО было плохим. Отклонение звезд от средних положений доходило до 1.0...1.5". Значения коэффициента корреляции смещения компонентов составили  $K_x = 0.96$  и  $K_y = 0.95$  по оси X и Y соответственно.

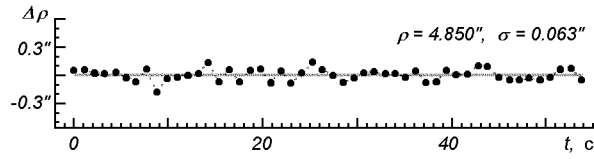


Рис. 7. Расстояния между компонентами А и В по данным OGS

Таблица 2. Оценки некоторых параметров для компонентов А и В звезды α Gem

Компонент	$V$	$\sigma_V$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$f_{1/2}$	$\sigma_f$	$N$
А (OGS)	$2.0^m$	$0.105^m$	$0.314''$	$0.211''$	$1.956''$	$0.155''$	50
В (OGS)	2.9	0.102	$0.309''$	$0.214''$	$2.059''$	$0.157''$	50
А (ГАО)	2.0	0.210	$1.251''$	$1.018''$	$3.351''$	$0.426''$	40
В (ГАО)	2.9	0.487	$1.300''$	$1.075''$	$3.434''$	$1.012''$	40

Таблица 3. Оценки разности некоторых параметров для компонентов А и В звезды α Gem по наблюдениям на OGS

$\Delta V$	$\sigma_V$	$\rho$	$\sigma_\rho$	$\Delta f_{1/2}$	$\sigma_f$	$N$
0.716	$0.058^m$	$4.850''$	$0.063''$	$0.103''$	$0.089''$	50

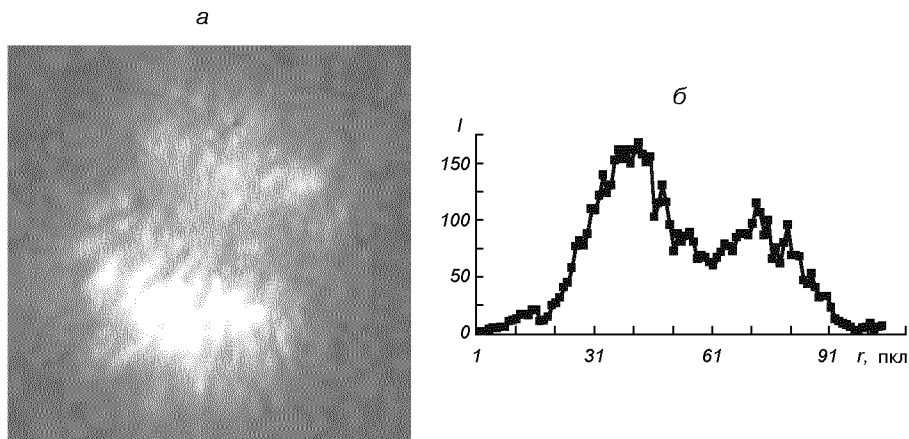


Рис. 8. Изображение (а) и фотометрический разрез (б) компонентов звезды α Gem по наблюдениям в ГАО

По наблюдениям в OGS были получены среднее расстояние  $\rho = 4.85''$  между компонентами, а также вариации  $\Delta\rho$  во время наблюдений (рис. 7).

Итоговые оценки полученных параметров приведены в табл. 2 и 3.

При наблюдениях в ГАО получены некоторые добавочные контрольные изображения звезды α Gem с короткими экспозициями. Изображения получены в кассегреневском фокусе телескопа АЗТ-2 ( $F = 10.5$  м). Исполь-



зовалась цветная CMOS-камера с разрешением  $3000 \times 2000$  пкл и размером пикселя 8 мкм ( $0.16''$ ). На рис. 8 показан пример изображения звезды и его фотометрический разрез. После сглаживания изображения гауссовым фильтром получено расстояние между компонентами  $\rho = 4.8''$ , что соответствует данным, полученным в OGS.

## ВЫВОДЫ

По результатам наблюдений на Оптической наземной станции ESA и в Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины был проведен анализ ПЗС-изображений с малыми экспозициями компонентов двойной звезды  $\alpha$  Gem с расстоянием между компонентами около  $4.8''$ . Результаты расчетов показывают, что перемещения изображений близких компонентов ( $\rho < 5''$ ) двойной звезды из-за атмосферной турбулентности происходят почти синхронно по каждой из осей координат в фокальной плоскости телескопов (коэффициент корреляции около 0.95). Наблюдалась также корреляция изменения блеска компонентов и диаметра изображения звезды. Итак, для компенсации эффектов турбулентности атмосферы при упреждающем наведении лазерного луча на геостационарный спутник возможно использование данных по турбулентности для видимого положения спутника. Эти результаты указывают на возможность корректного использования систем адаптивной оптики для компенсации атмосферной турбулентности при лазерных коммуникационных экспериментах с геостационарным спутником даже в условиях с не лучшим астроклиматом.

1. Кузьков В. П., Медведский М. М., Яцкив Д. Я. и др. Подготовка к экспериментам по оптической связи с геостационарным спутником ARTEMIS // *Космічна наука і технологія*.—2003.—9, № 4.—С. 79—83.
2. Alonso A., Reyes M., Sodnik Z. Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the Optical Ground Station // *Proc. SPIE*.—2004.—5572.—P. 372.
3. Andruk V., Butenko G., Ivashchenko Yu. N. Processing of CCD images of star fields using the MIDAS/ROMAFOT software package // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2003.—N. 4.—P. 71—74.
4. Foy R. Laser guide stars: principle, cone effect and tilt measurement // *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Optics in Astrophysics. Cargese, France, 16-28 September 2002. NATO Science Series. II. Mathematics, Physics and Chemistry.* — 198.—P. 249—273. ISBN 1-4020-3436-9. Berlin: Springer, 2005.
5. Khatri F. I., Boroson D. M., Murphy D. V., Sharma J. Link analysis of Mars-Earth optical communications system // *Proc. SPIE*.—2004.—5338.—P. 143K.
6. Kuz'kov V., Andruk V., Sodnik Z., et al. Investigation of atmospheric instability for communication experiments with ESA's geostationary satellite ARTEMIS // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2005.—N 5.—P. 561—565.
7. Kuz'kov V., Nedashkovskii V. A receiver with an avalanche photodiode for the optical communications channel from a geostationary satellite // *Instruments and Experimental Techniques*.—2004.—47, N 4.—P. 513—515.
8. Lena P. *Observational astrophysics. 2.5. Turbulent structure of earth's atmosphere.* — Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1988.—P. 41—48.
9. Reyes M., Comeron A., Sodnik Z., et al. Ground-to-satellite bidirectional laser links for validation of atmospheric turbulence model // *Proc. SPIE*.—2004.—N 5160.—P. 44—55.
10. Worley C. E., Douglass G. G. *Washington visual double star catalog 1996* // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1997.—125.—P. 523.

Поступила в редакцию 27.12.06