

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-443-448

УДК 621.035

О возможности применения моностатической схемы построения наземного телескопа при наблюдении космических объектов

Виктор Владимирович Клеймёнов¹, Иван Юрьевич Возмищев²,
 Елена Владимировна Новикова³✉

^{1,2,3} Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

¹ vka@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6113-127X>

² vka@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7693-3603>

³ vka@mil.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-5988-7641>

Аннотация

Предмет исследования. В современных крупноапертурных оптических системах слежения за астрономическими объектами широко внедряется технология бистатических схем, в которых лазер, а также главный и вспомогательный телескопы пространственно разнесены. Это требует принятия дополнительных мер при юстировке оптических осей телескопов, особенно при сопровождении низкоорбитальных космических объектов. Выбор бистатических схем в астрономических телескопах обусловлен проблемой «неопределенности наклона», свойственной моностатическим схемам формирования лазерной опорной звезды. Эта проблема вызвана трудностями или невозможностью определения наклона волнового фронта при дрожании лазерной опорной звезды в плоскости изображения. В работе рассмотрена моностатическая схема построения наземных адаптивных оптико-электронных систем. В данной схеме совмещены оптические оси лазера, генерирующего лазерную опорную звезду, и телескопа, служащего для получения изображения космических объектов посредством устранения фазовых возмущений атмосферы по излучению лазерной опорной звезды. **Метод.** Предложенный метод определения наклона волнового фронта в моностатической схеме основан на анализе математических выражений для дисперсий дрожания наклонов изображений лазерной опорной звезды и космического объекта. Рассмотрен случай, когда диаметр приемной апертуры телескопа значительно больше диаметра апертуры лазера. Подход базируется на высокой коррелированности мгновенных значений наклонов лазерного луча и принимаемого пучка от естественной звезды, передаваемых навстречу друг другу. При наблюдении низкоорбитальных малоразмерных космических объектов и лазерных опорных звезд предполагается, что они находятся в зоне Френеля приемной апертуры оптико-электронной системы и в пределах угла изопланатизма атмосферы, определяемого в рамках изотропной и локально-однородной модели турбулентности атмосферы. **Основные результаты.** Представленное решение позволяет определить значение мгновенного угла наклона изображения малозаметного космического объекта в фокальной плоскости приемной апертуры телескопа на основе измерения мгновенного угла наклона реально наблюдаемого изображения лазерной опорной звезды. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при разработке наземных адаптивных оптико-электронных систем слежения за низкоорбитальными малоразмерными космическими объектами.

Ключевые слова

моностатическая схема телескопа, адаптивная оптико-электронная система, лазерная опорная звезда, дрожание изображения, космический объект

Ссылка для цитирования: Клеймёнов В.В., Возмищев И.Ю., Новикова Е.В. О возможности применения моностатической схемы построения наземного телескопа при наблюдении космических объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 4. С. 443–448. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-443-448

On the feasibility of the monostatic scheme for constructing the land-based telescope at supervision of space objects

Victor V. Kleymionov¹, Ivan Yu. Vozmishchev², Elena V. Novikova³✉

^{1,2,3} Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

¹ vka@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6113-127X>

² vka@mil.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7693-3603>

³ vka@mil.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-5988-7641>

Abstract

In modern large aperture optical systems for tracking astronomical objects, the technology of bistatic schemes is widely introduced, in which the laser, the main and auxiliary telescopes are spatially separated. This requires additional measures to be taken when aligning the optical axes of telescopes, especially when tracking LEO space objects. The choice of bistatic schemes in astronomical telescopes is due to the problem of “tilt uncertainty” inherent in monostatic schemes for the formation of a laser reference star. This problem is caused by the difficulty or even the impossibility of determining the tilt of the wavefront when the laser guide star jitters in the image plane. The article discusses a monostatic scheme for constructing ground-based adaptive optoelectronic systems. The monostatic scheme combines the optical axis of the laser, which forms the laser guiding star, and the optical axis of the telescope, which serves to obtain images of space objects by eliminating phase disturbances of the atmosphere due to the radiation of the laser guiding star. The proposed method for determining the tilt of the wavefront in a monostatic scheme is based on the analysis of expressions for the dispersion of the tilt jitter of the images of a laser reference star and a space object for the case when the diameter of the receiving aperture of the telescope is much larger than the diameter of the aperture of the laser forming the laser reference star. This approach is based on the long-elicited strong correlation between the instantaneous values of the tilt of the laser beam and the received beam from a natural star, transmitted towards each other. When observing low-orbit small-sized space objects and laser reference stars, it is assumed that they are in the Fresnel zone of the receiving aperture of the optoelectronic system and within the isoplanatism angle of the atmosphere, determined within the framework of an isotropic and locally homogeneous model of atmospheric turbulence. The proposed solution made it possible to determine the value of the instantaneous tilt angle for the image of an inconspicuous space object in the focal plane of the receiving aperture of the telescope on the basis of measuring the instantaneous tilt angle for the actually observed image of the laser reference star. The results can be used in the development of ground-based adaptive optoelectronic tracking systems for low-orbit small-sized space objects.

Keywords

monostatic telescope scheme, adaptive optoelectronic system, laser guide star, image jitter, space object

For citation: Kleymionov V.V., Vozmishchev I. Yu., Novikova E.V. On the feasibility of the monostatic scheme for constructing the land-based telescope at supervision of space objects. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 443–448 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-443-448

Введение

Изображения естественных и искусственных космических объектов, получаемые через атмосферу без применения методов компенсации дрожания, формируются от кадра к кадру в разных областях фокальной плоскости оптико-электронной системы.

Вследствие этого при экспозиции, большей времени «замороженности» атмосферы, фокальное пятно расплывется. Размытие длинноэкспозиционного изображения может быть уменьшено как преддетекторными, так и последдетекторными методами [1]. Первые алгоритмы преддетекторной обработки изображений астрономических объектов заключались в их точном гидировании и компенсации мгновенных наклонов (дрожания) изображений. При цифровой обработке изображений регистрировалась серия короткоэкспозиционных изображений, совмещались координаты их центров, и суммировались центры тяжести.

С развитием адаптивной оптики при наблюдении космических объектов с яркостью, достаточной для обеспечения эффективной работы адаптивных оптических систем, за время короткой экспозиции (меньшего времени замороженности атмосферы 0,1–1 мс) вначале корректируется наклон изображения. Далее устраняются аберрации более высокого порядка с помощью

деформируемого зеркала, управляемого адаптивными оптическими системами. Такая технология обработки изображений обусловлена тем, что наибольший вклад в фазовые искажения принимаемого излучения вносят наклоны волнового фронта. Величина среднеквадратического отклонения волнового фронта аберраций порядка более высокого, чем наклоны, составляет не более 8–20 % [2–5].

При достаточной яркости космических объектов (со звездной величиной меньше 10^m) алгоритмы адаптации рассмотрены в работах [3, 4, 6], в частности в адаптивных оптических системах на основе датчика Шака–Гартмана. В случае наблюдения космических объектов слабой яркости (естественных звезд или мелких фрагментов космического мусора), принимаемого от них излучения может быть недостаточно для обеспечения эффективной работы адаптивных оптических систем на фоне их внутренних и внешних (атмосферных) шумов.

В последние годы при разработке зарубежных крупноапертурных оптико-электронных систем широкое применение нашли лазерные опорные звезды (ЛОЗ) – натриевые на высоте 90–100 км или рэлеевские на высоте 5–20 км. ЛОЗ формируются в поле зрения адаптивных оптических систем с помощью источника лазерного излучения. В настоящее время опубликованы теоретические и экспериментальные работы, посвящен-

ные ЛОЗ и их применению в астрономических телескопах [3, 4, 6, 7] и в наземных оптико-электронных системах наблюдения за космическими аппаратами [8, 9].

Для формирования ЛОЗ и приема рассеянного от нее излучения применяют моностатическую и гибридные бистатические схемы. Способы формирования и обработки принимаемого от них излучения определяют технический облик адаптивных оптических систем. В моностатической схеме оптические оси лазера, формирующего ЛОЗ, и телескопа, принимающего от нее рассеянное излучение, совмещены. В бистатических схемах для измерения общего наклона волнового фронта рассеянное излучение от ЛОЗ принимается не только главным телескопом оптико-электронной системы, но и дополнительно одним или несколькими телескопами. Это требует принятия дополнительных мер при юстировке оптических осей телескопов, особенно при сопровождении низкоорбитальных космических объектов.

По разным оценкам именно в зоне высот от 200 до 2000 км сосредоточена большая часть (70–80 %) космических объектов, в том числе мелких фрагментов космического мусора. При наблюдении низкоорбитальных космических объектов более предпочтительной является моностатическая схема. Однако данной схеме формирования ЛОЗ свойственна проблема компенсации глобального наклона волнового фронта [3, 6, 7, 10–13].

Проблема компенсации глобального наклона волнового фронта при использовании лазерных опорных звезд

При использовании ЛОЗ в наземной оптико-электронной системе лазерный пучок проходит через одни и те же неоднородности в атмосфере. Пучок отклоняется дважды: сначала для формирования звезды при распространении пучка снизу вверх, затем — обратно при рассеянии излучения от ЛОЗ и регистрации на приемной апертуре.

Дисперсия дрожания угла наклона изображения ЛОЗ в фокальной плоскости телескопа в диффузном приближении рассеянного от нее излучения определяется выражением [6]

$$\langle \varphi_{ls}^2 \rangle = 2^{1/6} \pi^{20,033} \Gamma(1/6) \times \times [d^{-1/3} + D^{-1/3} - 2^{7/6} (D^2 + d^2)^{-1/6}] \int_0^{z_{ls}} dh \times \times [1 - (h/z_{ls})]^{5/3} C_n^2(h), \quad (1)$$

представляющим сумму трех слагаемых: дисперсии угла наклона лазерного пучка, распространяющегося снизу вверх; дисперсии случайного углового смещения изображения ЛОЗ как неподвижного источника при распространении излучения сверху вниз; корреляционной составляющей, описывающей корреляцию между фазовыми флуктуациями (угловыми отклонениями) передаваемого пучка и принимаемой волны от ЛОЗ.

Здесь d — диаметр излучающей апертуры лазера, формирующего ЛОЗ (далее — зондирующий лазер); D — диаметр приемной апертуры телескопа; $\Gamma(*)$ — гамма-функция; z_{ls} — расстояние между зондирующим лазером и ЛОЗ (длина трассы); $C_n^2(h)$ — структурная

функция вариаций показателя преломления атмосферы на высоте h .

Когда в моностатической схеме лазерная звезда формируется всей апертурой, т. е. $d = D$, то, как следует из выражения (1), дисперсия дрожания $\langle \varphi_{ls}^2 \rangle = 0$. Это объясняется тем, что из-за взаимности фазовых флуктуаций невозможно разделить две составляющие наклона волнового фронта при его распространении в турбулентной атмосфере в прямом и обратном направлениях. В результате этого ЛОЗ в фокальной плоскости телескопа будет восприниматься как «неподвижная», несмотря на то что пучок света от космического объекта претерпевает случайные угловые отклонения на трассе распространения, и его изображение дрожит. В научной литературе данный эффект получил название «неопределенности наклона» [6, 7]. Это означает, что при $D = d$ не может быть измерен и скомпенсирован наклон волнового фронта при приеме излучения от космического объекта с помощью ЛОЗ, хотя в действительности пучок света от космического объекта (естественной звезды или космического аппарата, отражающего солнечное излучение) отклоняется при его распространении сверху вниз. Тогда дисперсия углового дрожания изображения космического объекта в фокальной плоскости телескопа равна

$$\langle \varphi_{ko}^2 \rangle = 2^{1/6} \pi^{20,033} \Gamma(1/6) D^{-1/3} \int_0^{z_{ko}} dh \times \times [1 - (h/z_{ko})]^{5/3} C_n^2(h), \quad (2)$$

где z_{ko} — дальность до космического объекта.

Наибольший практический интерес вызывает ситуация наблюдения ряда космических объектов, яркости которых (на фоне внешних — атмосферных и внутренних шумов адаптивной оптической системы) недостаточно для формирования изображения за время короткой экспозиции.

Рассмотрим возможность определения величины мгновенного углового смещения изображения малоразмерного и малозаметного («слабой яркости») космического объекта по измеренному мгновенному смещению изображения ЛОЗ в фокальной плоскости телескопа.

Метод определения угла наклона изображения космического объекта в моностатической схеме с лазерными опорными звездами

Предпосылкой для решения проблемы определения наклона волнового фронта излучения от космического объекта в моностатической схеме стала высокая коррелированность мгновенных значений случайных наклонов волнового фронта передаваемого лазерного луча и принимаемого излучения от естественной звезды. Так, в частности, с помощью численного моделирования, выполненного для вертикальной трассы [12] при равенстве передающей и приемной апертур ($D = d$) для лазерной натриевой опорной звезды, находящейся на высоте $H = 90$ км, получено значение коэффициента корреляции для коллимированного и сфокусированного лучей равное 0,99, а для рэлеевской ЛОЗ на высоте $H = 20$ км коэффициент корреляции составил 0,95 и

0,93 для коллимированного и сфокусированного лучей соответственно.

Предположим, что ЛОЗ и космические объекты находятся в пределах угла изопланатизма атмосферы, определяемого в рамках теории локально-однородной и изотропной модели турбулентности атмосферы выражением [13]

$$\theta_{is} = [2,91k^2(\sec\beta)^{8/3} \int_0^H C_n^2(h)h^{5/3}dh]^{-3/5}, \quad (3)$$

или [3]

$$\theta_{is} = 0,314(r_0/h_{ef})(\cos\beta)^{8/5},$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны; h_{ef} — высота эффективного слоя атмосферы; β — зенитный угол; r_0 — радиус пространственной когерентности фазовых возмущений атмосферы.

При этом оптическая ось зондирующего лазера направлена на космические объекты (на расчетное положение малозаметного космического объекта), и фокусируемый лазерный пучок достаточно широкий (что обеспечивается выбором диаметра апертуры лазера порядка $d = 2r_0$ [14]).

При наблюдении низкоорбитальных космических объектов необходимо учитывать следующие особенности:

- при диаметре приемной апертуры $D > 1,5$ м и $\lambda = 0,55$ мкм ЛОЗ как и низкоорбитальные космические объекты ($z_{ko} < 2000$ км) находятся в зоне Френеля приемной апертуры ОЭС, при этом выполняется условие:

$$\left(\frac{D^{2/3}}{4\lambda}\right) < z_{ko} < \left(\frac{D^2}{\lambda}\right),$$

в то время как астрономические объекты (естественные звезды) находятся в дальней зоне приемной апертуры;

- малозаметные космические объекты, как правило, являются и малоразмерными ($\Delta r < (\lambda z_{ko}/D)$, т. е. не разрешаемыми приемной апертурой телескопа диаметром D , и представляют собой, как и ЛОЗ, источник сферической волны;

- так как натриевая ЛОЗ формируется на высоте 90–100 км, то можно полагать, что она, как и космический объект, находится за пределами атмосферы, и интегральные значения $C_n^2(h)$ в выражениях (1) и (2) существенно не отличаются.

При дальнейшем рассмотрении сделаем допущение о том, что $z_{ko} \approx z_{ls}$. Допущение верно для низкоорбитальных космических объектов, так как дальность до натриевой лазерной опорной звезды $z_{ls} \approx 100$ км.

С учетом (1) и (2) можно записать:

$$\frac{\langle\varphi_{ls}^2\rangle}{\langle\varphi_{ko}^2\rangle} = [D^{-1/3} + d^{-1/3} - 2^{7/6}(D^2 + d^2)^{-1/6}]D^{1/3}. \quad (4)$$

Полагая $D \gg d$, обозначив $D/d = n(n \gg 1)$ и учитывая, что

$$D^{-1/3} + d^{-1/3} - 2^{7/6}(D^2 + d^2)^{-1/6} \approx (1 + n^{1/3} - 2^{7/6})D^{-1/3},$$

получаем коэффициент

$$\mu = \left(\frac{\langle\varphi_{ls}^2\rangle}{\langle\varphi_{ko}^2\rangle}\right)^{1/2} \approx (1 + n^{1/3} - 2^{7/6})^{1/2}.$$

Учитывая сильную коррелированность мгновенных значений наклонов зондирующего лазерного пучка, формирующего ЛОЗ, и принимаемого на апертуре телескопа излучения, рассеянного от ЛОЗ, можно считать, что

$$\varphi_{ko} \approx \varphi_{ls}/(1 + n^{1/3} - 2^{7/6})^{1/2}. \quad (5)$$

Типичное значение $D/r_0 = 40$ [3] для астрономических телескопов, работающих в видимом диапазоне длин волн, с диаметром приемной апертуры $D = 4$ м и при радиусе пространственной когерентности атмосферы $r_0 = 10$ см. Полагая диаметр апертуры зондирующего лазера $d = 2r_0$, получим $n = 20$ [14]. Для крупноапертурных телескопов с $D = 6$ –10 м, $n = 30$ –50, а для чрезвычайно больших телескопов с $D = 30$ –39 м возможно значение $n > 130$ [15, 16].

Для значений $n = 8; 27; 64; 125$ приведем результаты вычислений коэффициента μ равные 0,87; 1,33; 1,67; 1,94 соответственно.

Физическая интерпретация полученных результатов заключается в следующем. Изображение космического объекта, полученное с помощью отраженного от него излучения, при короткой экспозиции в фокальной плоскости телескопа отклонится на угол, пропорциональный среднеквадратическому отклонению $\varphi_{ls} \sim 1/D^{1/6}$.

Считая, что оптическая ось зондирующего лазера, формирующего ЛОЗ, совпадает с направлением на космический объект, при прохождении через атмосферу лазерный пучок (соответственно и ЛОЗ) отклонится на угол, среднеквадратическое отклонение которого $\varphi_{lb} \sim 1/d^{1/6}$. Как и ранее, полагаем, что при дрожании лазерный пучок не выйдет за пределы угла изопланатизма θ_{is} (3). Если бы при распространении излучения обратно от ЛОЗ до приемной апертуры не было бы атмосферы, то в фокальной плоскости телескопа изображение ЛОЗ отклонилось бы на угол $\varphi_{ls1} \sim 1/d^{1/6}$. Очевидно, что при $D \gg d$ угол $\varphi_{ls1} < \varphi_{lb}$.

В действительности при распространении через атмосферу и выполнении условия нахождения космического объекта и ЛОЗ в пределах угла изопланатизма, вследствие корреляционной зависимости фазовых флуктуаций прямой и обратной волн (в соответствии с выражением (1)), мгновенное положение изображения ЛОЗ в фокальной плоскости телескопа отклонится на угол φ_{ls} , причем $\varphi_{ls1} < \varphi_{ls} < \varphi_{lb}$.

Определив в плоскости изображения телескопа положение ЛОЗ и зная величину n , возможно в соответствии с выражением (4) для каждой короткой экспозиции рассчитать и скомпенсировать величину случайного углового отклонения изображения космического объекта.

При рассмотрении возможности определения мгновенного случайного углового отклонения изображения космического объекта по измерению мгновенного углового положения изображения ЛОЗ в фокальной

плоскости телескопа сделано допущение $z_{ko} = z_{ls}$. В действительности $z_{ko} \neq z_{ls}$.

Для телескопа с фокусным расстоянием f_{i1} изображение космического объекта формируется в плоскости, находящейся на расстоянии f_{ko} , соответствующем дальности z_{ko} :

$$\frac{1}{f_{i1}} = \frac{1}{f_{ko}} + \frac{1}{z_{ko}}. \quad (6)$$

Известно [1], что в процессе наблюдения за космическим объектом необходимо измерять дальность z_{ko} до него, например, активным каналом оптического локатора. Для продольной стабилизации положения формируемого изображения (или серии) необходимо в соответствии с (6) изменять фокусное расстояние телескопа f_{i1} в зависимости от изменения z_{ko} . Данное изменение осуществляется подвижками вторичного зеркала телескопа. При отсутствии контроля и регулировки фокуса имеет место дефокусировка изображений.

Изображение ЛОЗ наблюдается в фокальной плоскости телескопа с фокусным расстоянием f_{i2} , определяемой соотношением

$$\frac{1}{f_{i2}} = \frac{1}{f_{ls}} + \frac{1}{z_{ls}}.$$

При формировании ЛОЗ в направлении на космический объект (изменении зенитного угла β) необходимо принимать меры по устранению сферической абerra-

ции в плоскости изображения и ЛОЗ, и космического объекта.

Исходя из ортогональности aberrаций волнового фронта, в случае его наклонов и наличия сферических aberrаций, в соответствии с выражением (5) в фокальной плоскости изображения f_{ko} можно внести расчетную ошибку наклона, измеренную в фокальной плоскости изображения f_{ls} .

Заключение

При наблюдении низкоорбитальных космических объектов в целях компенсации случайного углового дрожания их изображений, связанных с турбулентной атмосферой, возможно применение моностатической схемы формирования лазерной опорной звезды в наземных оптико-электронных системах.

Описанный в работе принцип основан на возможности определения случайных мгновенных угловых отклонений изображений космических объектов в фокальной плоскости телескопа по измеренным смещениям энергетического центра тяжести изображений лазерной опорной звезды. Предложенный подход компенсации случайного углового дрожания изображений может быть использован при разработке наземных адаптивных оптико-электронных систем обнаружения и слежения за низкоорбитальными малоразмерными космическими объектами естественного и искусственного происхождения.

Литература

1. Свиридов К.Н. Атмосферная оптика высокого углового разрешения Т. 2. Статистическая оптимизация технологий достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения. М.: Знание, 2007. 368 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
3. Hardy J.W. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes. Oxford University Press, 1998. 437 p.
4. Tyson R.K. Principles of Adaptive Optics. 3rd ed. NY.: CRC Press, 2010. 350 p.
5. Noll R.J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence // Journal of the Optical Society of America. 1976. V. 63. N 3. P. 207–211. <https://doi.org/10.1364/JOSA.66.000207>
6. Большасова Л.А., Лукин В.П. Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. М.: Физматлит, 2012. 125 с.
7. Лукин В.П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // Успехи физических наук. 2014. Т. 184. № 6. С. 599–640.
8. Senft D., Hunt S., Swindle T.R., Morris N., Holmes R., Walker E., Lucas J., Toth J., Abercrombie M., Mooney J., Georges T. Sodium guidestar signal levels measured at AMOS and comparison to theory // Proc. of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2019.
9. Foy R. Laser guide star: Principle, cone effect and tilt measurement // NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. 2006. V. 198. P. 249–273. https://doi.org/10.1007/1-4020-3437-7_15
10. Quirrenbach A. The effects of atmospheric turbulence on astronomical observations // Adaptive Optics for Vision Science and Astronomy. ASP Conference Series. 2005. P. 129–144.
11. Rigaut F., d'Orgeville C. On practical aspects of Laser Guide Stars // Comptes Rendus Physique. 2005. V. 6. N 10. P. 1089–1098. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2005.11.014>

References

1. Sviridov K.N. *Atmospheric Optics of High Angular Resolution. Vol. 2. Statistic Optimization of the Technologies for High Angular Resolution of Optical Systems*. Moscow, Znanie Publ., 2007, 368 p. (in Russian)
2. Born M, Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Pergamon Press, 1965.
3. Hardy J.W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*. Oxford University Press, 1998, 437 p.
4. Tyson R.K. *Principles of Adaptive Optics*. 3rd ed. NY., CRC Press, 2010, 350 p.
5. Noll R.J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, vol. 63, no. 3, pp. 207–211. <https://doi.org/10.1364/JOSA.66.000207>
6. Bolbasova L.A., Lukin V.P. *Adaptive Correction of Atmospheric Distortions of optical Images Based on an Artificial Reference Source*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 125 p. (in Russian)
7. Lukin V.P. Adaptive optics in the formation of optical beams and images. *Physics-Uspeski*, 2014, vol. 57, no. 6, pp. 556–592. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0184.201406b.0599>
8. Senft D., Hunt S., Swindle T.R., Morris N., Holmes R., Walker E., Lucas J., Toth J., Abercrombie M., Mooney J., Georges T. Sodium guidestar signal levels measured at AMOS and comparison to theory. *Proc. of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2019.
9. Foy R. Laser guide star: Principle, cone effect and tilt measurement. *NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*, 2006, vol. 198, pp. 249–273. https://doi.org/10.1007/1-4020-3437-7_15
10. Quirrenbach A. The effects of atmospheric turbulence on astronomical observations. *Adaptive Optics for Vision Science and Astronomy. ASP Conference Series*, 2005, pp. 129–144.
11. Rigaut F., d'Orgeville C. On practical aspects of Laser Guide Stars. *Comptes Rendus Physique*, 2005, vol. 6, no. 10, pp. 1089–1098. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2005.11.014>

12. Valley G.C. Isoplanatic degradation of tilt correction and short-term imaging systems // *Applied Optics*. 1980. V. 19. N 4. P. 574–577. <https://doi.org/10.1364/AO.19.000574>
13. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
14. Клеймёнов В.В., Новикова Е.В., Олейников М.И. О выборе диаметра апертуры зондирующего лазера в наземных адаптивных оптико-электронных системах при формировании натриевой опорной звезды // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 1. С. 24–30. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-1-24-30>
15. Клеймёнов В.В., Новикова Е.В. Экстремально большие наземные оптические телескопы // *Известия вузов. Приборостроение*. 2021. № 1. С. 5–20. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-1-5-20>
16. Selina R.J., Murphy E.J., McKinnon M., Beasley A., Butler B., Carilli C., Clark B., Erickson A., Grammer W., Jackson J., Kent B., Mason B., Morgan M., Ojeda O., Shillue W., Sturgis S., Urbain D. The next-generation Very Large Array: a technical overview // *Proceedings of SPIE*. 2018. V. 10700. P. 107001O. <https://doi.org/10.1117/12.2312089>
12. Valley G.C. Isoplanatic degradation of tilt correction and short-term imaging systems. *Applied Optics*, 1980, vol. 19, no. 4, pp. 574–577. <https://doi.org/10.1364/AO.19.000574>
13. Tatarskii V.I. *Wave Propagation in Turbulent Media*. Moscow, Nauka Publ., 1967, 548 p. (in Russian)
14. Kleymionov V.V., Novikova E.V., Oleynikov M.I. On the choice of the aperture diameter of the probe laser in ground-based adaptive optoelectronic systems in the formation of a sodium reference star. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 24–30. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-1-24-30>
15. Kleymyonov V.V., Novikova E.V. Extremely large ground-based optical telescopes. *Journal of Instrument Engineerin*, 2021, no. 1, pp. 5–20. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-1-5-20>
16. Selina R.J., Murphy E.J., McKinnon M., Beasley A., Butler B., Carilli C., Clark B., Erickson A., Grammer W., Jackson J., Kent B., Mason B., Morgan M., Ojeda O., Shillue W., Sturgis S., Urbain D. The next-generation Very Large Array: a technical overview. *Proceedings of SPIE*, 2018, vol. 10700, pp. 107001O. <https://doi.org/10.1117/12.2312089>

Авторы

Клеймёнов Виктор Владимирович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [sc 57222388467](https://orcid.org/0000-0002-6113-127X), <https://orcid.org/0000-0002-6113-127X>, vka@mil.ru

Возмисhev Иван Юрьевич — кандидат технических наук, начальник лаборатории, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-7693-3603>, vka@mil.ru

Новикова Елена Владимировна — старший научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [sc 57222389043](https://orcid.org/0000-0002-5988-7641), <https://orcid.org/0000-0002-5988-7641>, vka@mil.ru

Статья поступила в редакцию 20.05.2021
Одобрена после рецензирования 14.06.2021
Принята к печати 30.07.2021

Authors

Victor V. Kleymionov — Dr.Sc., Professor, Principal Researcher, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [sc 57222388467](https://orcid.org/0000-0002-6113-127X), <https://orcid.org/0000-0002-6113-127X>, vka@mil.ru

Ivan Yu. Vozmishchev — PhD, Head of Laboratory, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7693-3603>, vka@mil.ru

Elena V. Novikova — Senior Researcher, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [sc 57222389043](https://orcid.org/0000-0002-5988-7641), <https://orcid.org/0000-0002-5988-7641>, vka@mil.ru

Received 20.05.2021
Approved after reviewing 14.06.2021
Accepted 30.07.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»